



**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

**PROYECTO FIN DE CARRERA:**

**VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CORRECCIÓN DE LA  
TEMPERATURA E IRRADIANCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS  
DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS**

**AUTOR: CÉSAR MONFORT GALLEGO**

**TUTOR: VICENTE SALAS MERINO**

**NOVIEMBRE 2011**





# ÍNDICE

# ÍNDICE

1. OBJETIVOS .....	8
2. INTRODUCCIÓN .....	11
2.1. Impacto social y medioambiental .....	13
2.2. Protocolo de Kioto y cambio climático.....	15
2.3. Historia de la fotovoltaica .....	17
2.4. Beneficios de la fotovoltaica .....	21
2.5. Mercado fotovoltaico actual .....	22
3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	26
3.1. Sistema aislado.....	28
3.1.1. Generador fotovoltaico.....	29
3.1.2. Inversor .....	31
3.1.3. Sistema de acumulación o banco de baterías.....	35
3.1.4. Regulador de carga.....	37
3.1.5. Aplicaciones.....	39
3.2. Sistema conectado a la red .....	40
3.2.1. Generador fotovoltaico.....	42
3.2.2. Inversor .....	44
3.2.3. Contador de energía .....	48
3.2.4. El seguidor solar .....	49
3.2.5. Los equipos de consumo o cargas.....	49
3.2.6. Aplicaciones.....	50
4. GENERADOR FOTOVOLTAICO .....	52
4.1. Célula fotovoltaica.....	54
4.1.1. Tecnologías de las células fotovoltaicas .....	57
4.2. Módulo fotovoltaico.....	68

4.2.1.	Partes del módulo fotovoltaico.....	68
4.2.2.	Tipos de paneles según su forma.....	71
4.2.3.	Curva característica.....	74
5.	MÉTODOS DE TRANSLACIÓN DE CURVAS .....	80
5.1.	Procedimiento 1 .....	81
5.1.1.	Determinación de la resistencia interna $R_s$ .....	83
5.1.2.	Determinación del factor de corrección $k$ .....	84
5.2.	Procedimiento 2 .....	87
5.2.1.	Determinación de la resistencia interna $R_s'$ .....	89
5.2.2.	Determinación del factor de corrección $k'$ .....	91
5.3.	Procedimiento 3 .....	93
5.3.1.	Corrección para temperatura e irradiancia para dos curvas .....	94
5.3.2.	Corrección para temperatura e irradiancia para tres curvas.....	96
5.3.3.	Corrección para temperatura e irradiancia para cuatro curvas .....	98
6.	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	99
6.1.	Procedimiento 1 .....	100
6.1.1.	Módulo A.....	101
6.1.2.	Módulo B.....	106
6.1.3.	Módulo C.....	111
6.1.4.	Módulo D.....	116
6.2.	Procedimiento 2 .....	121
6.2.1.	Módulo A.....	122
6.2.2.	Módulo B.....	137
6.2.3.	Módulo C.....	132
6.2.4.	Módulo D.....	137
6.3.	Procedimiento 3 .....	142
6.3.1.	Módulo A.....	142
6.3.2.	Módulo B.....	152
6.3.3.	Módulo C.....	162



6.3.4. Módulo D.....	173
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	184
8. REFERENCIAS .....	187
9. ANEXOS.....	190
9.1. ANEXO I: NORMATIVA .....	191
9.2. ANEXO II: PROGRAMACION DE LA HOJA EXCEL PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS EN EL PROCEDIMIENTO 3 .....	199
9.2.1. Corrección para dos curvas .....	199
9.2.2. Corrección para tres curvas .....	201
9.2.3. Corrección para cuatro curvas .....	205

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a toda mi familia el apoyo que me han dado durante todo el tiempo que ha durado la realización de este proyecto, y en especial a mi madre, que siempre me ha apoyado cuando las cosas no iban bien.

Mención especial para mi abuelo, ya que estoy seguro de que le hubiera gustado verme con la carrera finalizada.

Un abrazo muy fuerte para todos ellos.

Y finalmente, a mi tutor Vicente Salas, por su ayuda en la recopilación de datos y la organización del proyecto, sin la cual no habría sido posible llevarlo a cabo.

# **CAPÍTULO 1**

## **OBJETIVOS**



## 1. OBJETIVOS

El tema central de este proyecto son los sistemas fotovoltaicos, y más concretamente, los módulos fotovoltaicos. Estos módulos fotovoltaicos están caracterizados por una curva corriente-tensión que depende directamente de la irradiancia y la temperatura a la que están sometidos.

Dicho esto, el objetivo principal de este proyecto es el de verificar que los resultados obtenidos al aplicar tres métodos de traslación de curvas estipulados por la Norma UNE-EN 60891 a unas curvas características extraídas de unos módulos fotovoltaicos, concuerdan con otras curvas características del mismo módulo y en las mismas condiciones.

Para llevar a cabo esta verificación se van a aplicar dichos métodos de traslación de curvas a curvas características extraídas de cuatro módulos fotovoltaicos que se encuentran instalados en la Universidad Carlos III de Madrid, en el término municipal de Leganés, provincia de Madrid, ubicada en la azotea del edificio Betancourt y a los que denominaremos Módulos A, B, C y D. De cada uno de dichos módulos se han extraído una serie de curvas características medidas en distintos días y a distintas horas para realizar los cálculos pertinentes.

Además, otro de los objetivos de este proyecto es que el proceso de cálculo de esta verificación esté lo mas automatizado posible, es decir, que el trabajo realizado sirva para obtener las curvas características corregidas de forma automática sin necesidad de repetir todos los cálculos. Para ello se han creado una plantilla de Excel para cada procedimiento en las que solo es necesario introducir las curvas que se desean corregir y esta realiza los cálculos automáticamente, obteniendo la curva corregida.

Para ello, vamos a comenzar haciendo una breve introducción en el capítulo 2 sobre los sistemas fotovoltaicos, desde sus orígenes hasta su situación en la actualidad, para después hacer una descripción mas general de los sistemas fotovoltaicos en el capítulo 3, en el que se explicará los tipos que hay, así como las partes de las que están compuestos. Posteriormente, en el capítulo 4, vamos a centrarnos en los generadores fotovoltaicos, que es la parte que nos atañe dentro de los sistemas fotovoltaicos y en los que también se comentarán los distintos tipos de módulos o paneles solares que existen, así como la curva característica de los mismos y sus parámetros más representativos. A continuación se explicaran a fondo los distintos métodos de traslación de curvas y el cálculo de sus respectivos parámetros de corrección en el capítulo 5.

En el capítulo 6 podremos ver los resultados obtenidos después de aplicar los distintos métodos de traslación de curvas explicados en el capítulo anterior a los cuatro módulos fotovoltaicos citados anteriormente.

Para finalizar, en el capítulo 7, se comentaran las conclusiones extraídas después de la realización de este proyecto y las posibles futuras aplicaciones que éste pudiera tener.

# **CAPÍTULO 2**

## **INTRODUCCIÓN**

## 2. INTRODUCCIÓN

Las Energías Renovables son fuente de energía continua e inagotable, son la alternativa del futuro ya que su impacto medioambiental es mínimo, frente a las energías actuales.

Se trata de energías limpias, que se pueden utilizar de forma auto gestionada, ya que permiten ser aprovechadas en el mismo lugar donde se producen.

Se dividen en las siguientes categorías dependiendo de los recursos naturales utilizados para la generación de energía:

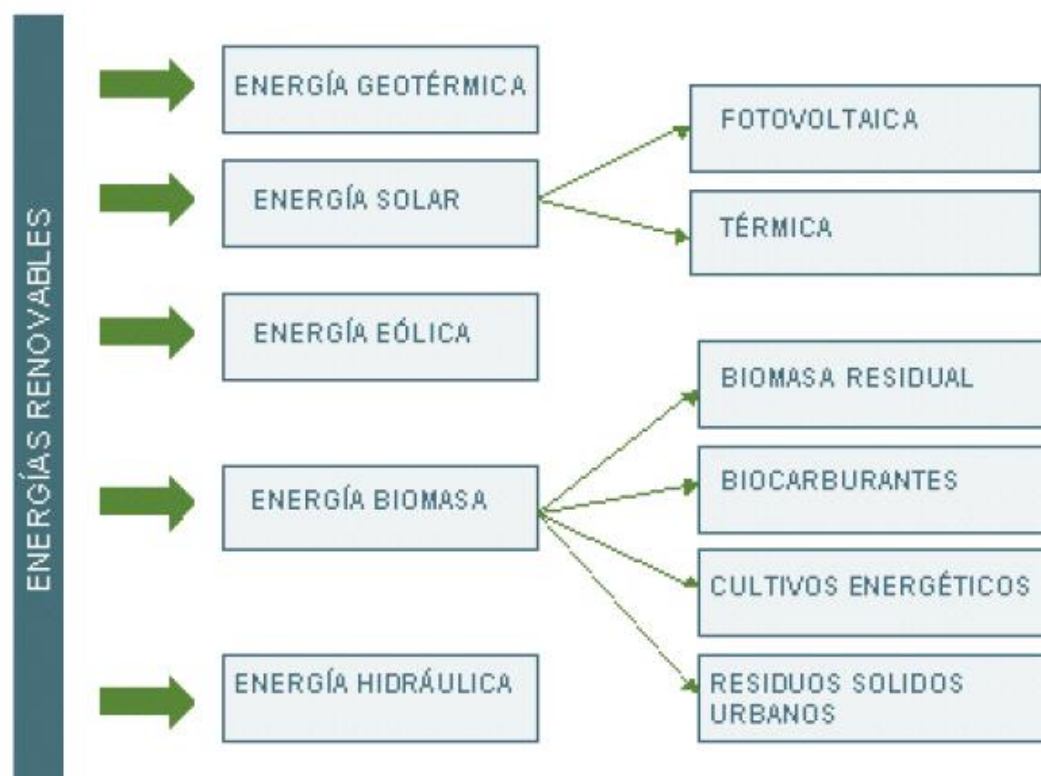


Figura 1. Energías renovables

El sector fotovoltaico se encuentra en estos momentos a la vanguardia de las Energías Renovables. Durante los últimos años existe una conciencia mayor del aprovechamiento de los recursos naturales como fuente de energía. Se ha incrementado el deseo de utilizar energías renovables para preservar el medio ambiente.

La energía solar fotovoltaica es una fuente fiable de producción de energía eléctrica.

Supone la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico, utilizando como medio las “células solares”. [1]

## **2.1. IMPACTO SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL**

El uso de energías renovables tiene importantes beneficios medioambientales puesto que sustituyen combustibles fósiles como es el caso del carbón o el petróleo. La concienciación de la preserva del medio ambiente está cada día más presente en la sociedad.

El fomento de las Energías Renovables es uno de los puntos fuertes tanto de la política europea como española.

Para ello se están promoviendo distintos tipos de ayuda por parte de los Gobiernos, para dar apoyo a inversiones y facilitar el desarrollo tecnológico.

Se ayuda por tanto a crear una percepción de riesgo menor ante las energías renovables.

La Comisión Europea ha desarrollado además varias iniciativas a favor del desarrollo de las Energías Renovables en Europa lo que implica el desarrollo de normativas legales que afectan a todos los estados miembros.

A parte de esto, muchas Comunidades Autónomas tienen programas complementarios al marco Europeo para promocionar las energías renovables.

Según el Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud de CCOO, las energías renovables emplearon a más de 89.000 trabajadores (empleos directos) en 2007. Las previsiones superan los 94.000 empleos directos para 2010.

El impacto ambiental en la generación de electricidad de las energías convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables según los resultados del estudio “Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad”, elaborado por AUMA y auspiciado por ocho instituciones entre las que se encuentran los órganos competentes de cinco gobiernos autónomos (Cataluña, Aragón, País Vasco, Navarra y Galicia), el IDAE, el Ciemat y la Asociación de Productores de Energías Renovables-APPA.

Con el uso de energías renovables se pretende que las fuentes de obtención actuales como el petróleo, el gas y el carbón pasen a un segundo plano. Debemos tener en cuenta que estas fuentes son recursos limitados y no distribuidos equitativamente por

el planeta. Con el actual modelo energético las nuevas generaciones verían el agotamiento de esas fuentes, comprometiendo el desarrollo de la humanidad.[1]

## 2.2. PROTOCOLO DE KIOTO Y CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático supone un aumento de la temperatura del planeta. En un futuro este tendrá consecuencias nefastas. El cambio climático es uno de los puntos que se desean solucionar con el uso de las energías renovables.

Los datos muestran que la temperatura anual en Europa se ha incrementado entre los 0.3°C y 0.6°C desde 1900, la década de los 90 ha sido la más calurosa de la siglo, el nivel del mar ha crecido entre 10 y 25 cm en los últimos 100 años y se ha reducido la superficie de los hielos continentales y oceánicos durante este siglo.

Son cambios evidentes y la mayoría de las causas pueden atribuirse a la emisión de los gases de efecto invernadero y aerosoles por la actividad humana.

Ante este hecho los gobiernos acordaron en **1997** el Protocolo de Kioto del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la **ONU (UNFCCC)**. El acuerdo ha entrado en vigor sólo después de que 55 naciones que suman el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero lo ha ratificado. En la actualidad 129 países, lo han ratificado alcanzando el 61,6 % de las emisiones como indica el barómetro de la **UNFCCC**.

El objetivo del Protocolo de Kioto es conseguir reducir un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008- 2012.

Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos. Para ello contiene objetivos legalmente obligatorios para que los países industrializados reeducan las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero de origen humano como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

### Situación en España:

La Unión Europea se comprometió, dentro del Protocolo de Kioto, a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero un 8% sobre los niveles de 1990 para el período 2008-2012.

Dentro de las negociaciones internas en Europa para un correcto reparto de compromisos de reducción, y con objeto de llegar a la convergencia económica europea, España se comprometió a no aumentar sus emisiones de gases de efecto invernadero por encima del 15% sobre los niveles de 1990.

En marzo 2007, se establece el compromiso de reducir como mínimo un 20% la emisión de gases con efecto invernadero y para el 2020 reducción de un 30% en los países desarrollados. Como objetivo obligatorio se ha establecido para la misma fecha, que el 20% de la energía consumida sea de origen renovable (biomasa, hidráulica, eólica y solar) frente al actual 12% establecido en el libro blanco de las Energías Renovables.



La perspectiva a más largo plazo, 2050, es disminuir entre el 60 y 80% los gases contaminantes.

El Plan de Energías Renovables 2005-2010 es el que está actualmente vigente y establece como objetivo para el año 2010 la generación de un 12% de la energía primaria mediante fuentes de energía renovable.

Las energías renovables aportaron en 2008 el 7,6% del consumo de energía primaria en España, lo que supone un incremento de seis décimas con respecto al balance anterior, según datos aportados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Teniendo en cuenta este crecimiento, el objetivo del 12% de consumo en renovables, se desplaza hasta el año 2014.

(FUENTE DE INFORMACIÓN GREEN PEACE)

### **2.3. HISTORIA DE LA FOTOVOLTAICA**

Antes de introducirnos en el tema de los sistemas fotovoltaicos, vamos a hacer una breve introducción en la que vamos a remontarnos a sus orígenes para ver cómo ha ido evolucionando la energía fotovoltaica desde los primeros experimentos de Becquerel, pasando por su desarrollo y expansión hasta nuestros días.

En 1839 el físico experimental francés Edmund Becquerel, descubrió el efecto fotovoltaico mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica de dos

electrodos sumergidos en una sustancia electrolítica. Esta pila aumentó su generación de electricidad al ser expuesta a la luz. A fines del siglo XIX científicos tales como W. Smith, W. Adas y R. Day descubren la fotoconductividad del selenio y construyen la primera celda experimental hecha de una oblea de selenio. En 1904 Albert Einstein publica su *paper* acerca del efecto fotovoltaico (junto con su *paper* de la teoría de la relatividad), por este documento es galardonado en 1921 con el Premio Nobel. Recién en 1941 se construye un dispositivo que puede ser llamado “celda solar”, fue fabricada de selenio y tenía una eficiencia del 1 %. La compañía Western Electric fue la primera en comercializar las celdas solares en 1955.

Mientras tanto científicos de diversas partes del mundo realizaban experimentos en combinaciones como el cobre y óxido cuproso, en Silicio Monocristalino, en Cadmio – Silicio, Germanio Monocristalino. En ese mismo año a la U.S. Signal Corps le fue asignada la tarea de construir fuentes de poder para satélites espaciales. Los estudios de esta compañía comenzaron con celdas de una eficiencia de un 4,5 %, y en tres años lograron que esta eficiencia subiera hasta un 9 %. Fue entonces cuando en 1958 fue lanzado al espacio el primer satélite que utilizaba celdas fotovoltaicas, el Vanguard I. Éste tenía un sistema de poder de 0.1 W, en aproximadamente 100 cm<sup>2</sup> y estuvo operativo por 8 años. Ese mismo año se lanzaron 3 satélites con esta misma tecnología, el Explorer III, el Vanguard II y el Sputnik-3. Desde este año las celdas solares aumentaron su utilización en naves espaciales, y el aumento de eficiencia seguía subiendo a pasos agigantados. Fue así como en 1960 Hoffman Electronics conseguía fabricar una celda con un 14 % de eficiencia. Aún cuando para la NASA fuese más importante la seguridad que el costo en sus naves espaciales, y por ende utilizaba celdas solares, en la tierra la energía fotovoltaica era 50 veces más cara que cualquier fuente convencional de generación, por lo que fue excluida para el uso terrestre.

En la década de los sesenta, la potencia instalada de las celdas solares de las naves espaciales y satélites alcanzaba a 1 KW. En 1973 se produce el embargo de petróleo

impuesto por la OPEC, con lo cual se inicia una política de investigación del uso de celdas solares en la Tierra, se destinan fondos por sobre los 300 millones de dólares por año, y se comienza a investigar nuevos materiales para la construcción de las celdas, tales como el silicio policristalino, las celdas de película delgada, combinaciones CdS/Cu<sub>2</sub> y Silicio amorfo, con el fin de abaratar los costos de éstas. En esta misma década comienza la NASA a instalar sistemas de generación fotovoltaica por todo E.E.U.U. para fines de refrigeración, iluminación de calles, iluminación clínica y aparatos de televisión, bombeo de agua, etc.

A principios de los años 80', la compañía ARCO Solar fabricaba más de 1 MW de celdas solares por año. Es el comienzo de la masificación de módulos de 1,4 a 6 KW en torres de departamentos, áreas apartadas del tendido eléctrico, centros comerciales y prototipos de automóviles. La producción mundial de celdas en el año 1982 era de 9,3 MW y en 1983 de 21,3 MW, haciendo que se duplique la producción en sólo un año, y alcanzando ventas de alrededor de US\$250 millones. En 1985 se alcanzaba un 20 % de eficiencia en celdas fotovoltaicas, y existían módulos en todas partes del mundo: E.E.U.U., Australia, España, Kenya, Alemania, Ecuador, Japón por nombrar algunos. En Chile se instalaron los primeros módulos en la década de los setenta, principalmente en lugares rurales con módulos de 50 W y baterías de 150 Ah suministrando energía a artefactos de 12 V.

Ya en los noventa, ARCO Solar es comprada por Siemens, formando Siemens Solar Industries, una de las firmas de mayor producción de celdas solares a nivel mundial. A principios de esta década se instala en la Antártica un sistema de 0.5 KW con baterías de 2,4 KWh para suministrar energía a equipos de un laboratorio. En 1996 comienzan estudios para la utilización de cobre-indio-diselenio en celdas, y de celdas súper eficientes. A fines del siglo pasado en Grecia se aprueba la instalación de una planta de 5 MW en Creta, de un proyecto de 50 MW de la empresa Enron Solar. Aún cuando este proyecto era magno, ya estaba en funcionamiento en California una planta de 6,5 MW

produciendo alrededor de 12 millones de kWh por año, suministrando energía a cerca de 2.500 hogares como promedio.

Hoy en día las celdas fotovoltaicas son utilizadas en prácticamente todo el mundo, generan el 2,1 % de la energía necesaria para mover al mundo, una industria que en 25 años pasó de producir casi nada a fabricar 70 - 80 MW anuales y con un costo por W que bajó desde los US\$50 hasta los 5 US\$/W, con alrededor de 40 MW conectados a la red eléctrica.

Las instalaciones de módulos fotovoltaicos, objeto de estudio del presente proyecto, han dejado de ser meras experiencias piloto para integrarse en el conjunto de generadores eléctricos que se añaden al complejo sistema de la Red Eléctrica Española, y que continuarán expandiéndose con vigor en el futuro, al amparo de la creciente toma de conciencia sobre los problemas medioambientales que conlleva la estructura actual de la producción de electricidad, fuertemente dependiente de la quema de combustibles fósiles.

Este tipo de sistemas fotovoltaicos no son muy difundidos a nivel comercial en áreas urbanas o con posibilidad de conectarse a una red de electrificación, debido a que la fabricación de las celdas solares que conforman los paneles, principales componentes del sistema fotovoltaico, requiere actualmente un elevado consumo energético; lo que se traduce en alto costo de inversión inicial.

Por otra parte, este tipo de tecnología presenta numerosas ventajas: instalación simple, emplea una fuente de energía limpia y gratuita, su operación es automática y silenciosa, requiere poco mantenimiento y es amigable con el ambiente. Dos ventajas principales las instalaciones de generación fotovoltaica es que son autónomas y fácilmente expandibles.

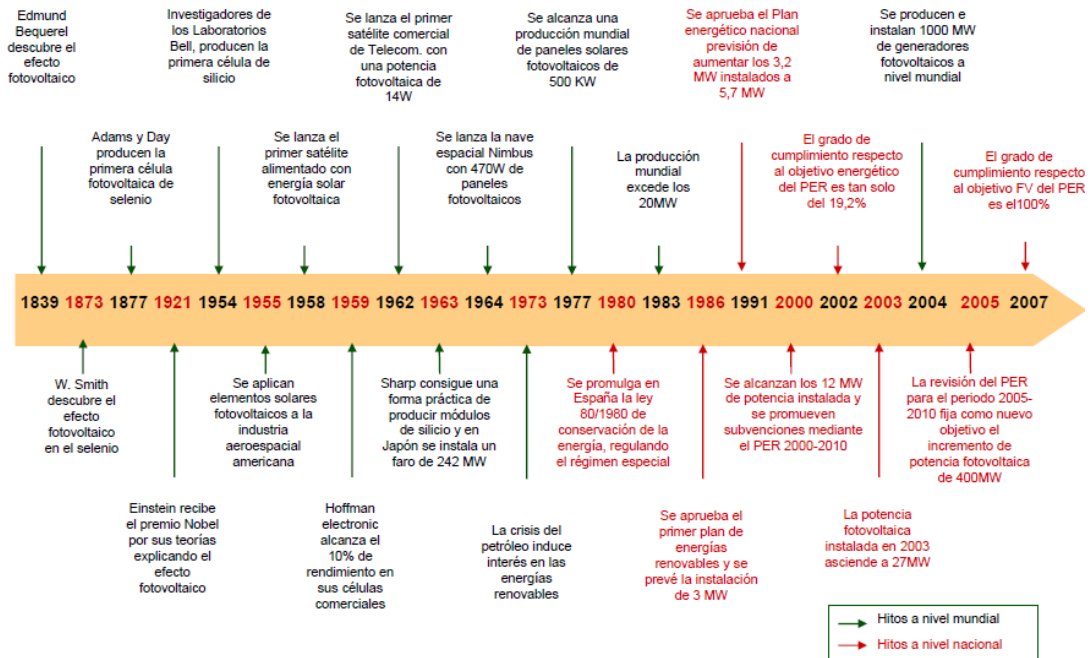


Figura 2. Evolución de la fotovoltaica.

## 2.4. BENEFICIOS DE LA FOTOVOLTAICA

Los sistemas fotovoltaicos son actualmente una de las inversiones más rentables. La utilización del Sol como fuente de energía supone grandes ventajas.

Los usos dados a la Energía Solar Fotovoltaica pueden ser numerosos. Los sistemas aislados de la red pueden tener usos como viviendas, bombeos, repetidores de telecomunicaciones... Mediante instalaciones conectadas a la red eléctrica se pueden utilizar para instalaciones pequeñas, como sería el caso de viviendas o aplicaciones a mayor volumen, como sería el caso de centrales, de hasta 5MW.

La energía solar fotovoltaica representa una buena solución para aquellas zonas donde la energía eléctrica no llega. Preservando las condiciones del entorno, como puede ser en el caso de los Parques Protegidos.

Los beneficios que obtenemos de la Energía Solar Fotovoltaica son numerosos entre los que destacan:

- Se trata de una fuente limpia e inagotable puesto que su fuente es el Sol.
- Bajo impacto medioambiental.
- Elevada calidad energética.

Una de las principales acciones positivas que supone su uso es la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Según fuentes del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), cada KWh generado con energía solar fotovoltaica evita la emisión a la atmósfera de aproximadamente un kilo de CO<sub>2</sub> comparándolo con la generación eléctrica con carbón y aproximadamente 400 gramos de CO<sub>2</sub> en el caso de compararlo con la generación eléctrica con gas natural.

## **2.5. MERCADO FOTOVOLTAICO ACTUAL**

Si por un lado las primas y tarifas van a ser modificadas, pudiendo desacelerar las inversiones en energía renovable de este tipo, el nuevo Código Técnico de la

Edificación establece un aporte mínimo de energía fotovoltaica en las instalaciones de nueva construcción.

La potencia mínima exigida dependerá de la zona climática donde se ubique la instalación, el tipo de uso del edificio y la superficie construida del mismo. El ámbito de aplicación se reduce a Centros comerciales, oficinas, hoteles y hostales, hospitales y pabellones que cumplan una superficie de instalación no inferior a 5000 m<sup>2</sup> construidos.

La determinación de la potencia pico a instalar para cada uso se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = C \times (A \times S + B)$$

Donde:

- P es la potencia pico mínima a instalar, en kWp. La potencia pico es la potencia máxima del generador fotovoltaico en condiciones estándar de medida (irradiancia de 1.000 W/m<sup>2</sup>, distribución espectral AM 1,5 G y temperatura de célula de 25°C).
- C es el coeficiente climático, que dependerá de la zona climática donde se encuentre el edificio bajo la aplicación de la exigencia. Toma valores desde 1,0 para la zona climática menos favorable, hasta 1,5 para la zona climática más favorable. Se definen 5 zonas climáticas.

- A y B son dos coeficientes que toman distintos valores según el uso del edificio. A se expresa en kWp/m<sup>2</sup>, y B en kWp.
- S es la superficie construida del edificio, en m<sup>2</sup>.

Desde el punto de vista económico, la regulación de la tarifa según el RD 661/2007 ha puesto en pie de guerra al mercado fotovoltaico.

Este **RD 661/2007** tiene en cuenta un **plazo de mantenimiento** de las tarifas y primas:

En el art. 37 de dicho Real Decreto se establece como objetivo de potencia instalada, 371 MW.

Pero según el Art.22, cuando la CNE indicase que el 85% de 371 MW( 315 MW) estuvieran conectados y facturando dentro del sistema electrónico, se establecería un plazo no menos a 12 meses para poder seguir inscribiéndose en el registro de instalaciones de régimen especial.

El 27 de Septiembre de 2007, este hecho sucede. Se publica la información por parte de la Comisión Nacional de Energía (CNE) del cumplimiento de los objetivos de las instalaciones en Régimen Especial.

Según se declara, con objeto de continuar con la implantación de esta tecnología se aumenta el objetivo vigente de 371 MW de potencia instalada conectada a la red, recogido en el RD 661/2007, de 25 de Mayo, a una potencia de 1200 MW.



En el mes de mayo de 2008, se alcanza a 1000MW la potencia instalada. Con la implantación del RD 1578/2008 se busca una continuidad regulada en dentro de las instalaciones pertenecientes al subgrupo b.1.1 recogidas en el artículo 2 del Real decreto 661/2007, que se clasifican en instalaciones fotovoltaicas de dos tipos:

- Ubicadas en cubiertas, fachadas o sobre estructuras fijas para aparcamientos o de sombreamiento.
- Las instalaciones no recogidas en el punto anterior.

El RD 1578/2008 establece unos cupos de potencia anuales para la asignación de la prima según el registro y las inscripciones de las instalaciones en régimen de producción especial.

El sector fotovoltaico tendrá que ajustar la evolución de crecimiento de los últimos años. Actualmente este índice de crecimiento se sitúa en torno a 400% en el último año y la desaceleración podría situarlo alrededor del 20%. Un crecimiento estable y sostenido como plantean la Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF) y la Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA). Este plan se denomina 'Fotovoltaica 20'. En esta propuesta, la fotovoltaica tiene un crecimiento del 20% anual, lo que permite equiparar el coste del kilowatio fotovoltaico al precio doméstico de la electricidad en 20 céntimos de euro/kWh, disponer de unos 20.000 MW instalados y cubrir el 20% del crecimiento de la demanda eléctrica prevista hasta el final de la próxima década.

# **CAPÍTULO 3**

## **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

### 3. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Se denomina sistema fotovoltaico al conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible en utilizable como energía eléctrica.

Un sistema fotovoltaico se basa en la propiedad que tienen ciertos materiales de convertir la energía luminosa que reciben en energía eléctrica. A la energía luminosa incidente total por unidad de área se le denomina *Irradiancia global  $G$*  y se mide en vatios-hora por metro cuadrado ( $\text{W/m}^2$ ) o ( $\text{J/m}^2$ ). Normalmente, la irradiación se refiere a un cierto periodo de tiempo, y así se habla, por ejemplo, de irradiación horaria, diaria o mensual, como la energía luminosa incidente por unidad de superficie en una hora, un día o un mes, respectivamente.

Debido a la naturaleza aleatoria de la energía solar, no se puede determinar con exactitud la radiación que llegará a la superficie terrestre en el lugar de la instalación. Hay que conformarse con trabajar con datos estadísticos basados en la “*historia solar*” del lugar, datos normalmente recogidos en las estaciones meteorológicas, y también en tablas y bases de datos. En la mayoría de los casos no encontraremos información detallada y tendremos que asumir valores aproximados.

Existen varias organizaciones que dedican a la producción de mapas que incluyen valores medios de irradiación global diaria para una región. Estos valores también se conocen como “horas de *irradiación solar pico* al día por metro cuadrado”. Las horas de irradiación solar pico para un determinado lugar son una manera de simplificar nuestros cálculos. Cuando hablamos de una localidad con 4 horas de irradiación solar

(pico) al día queremos decir que la irradiación solar en dicho lugar es equivalente a 4 horas con un radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Existen dos tipos de aprovechamiento de la energía solar:

- Sistemas aislados
- Sistemas conectados a la red eléctrica convencional

### **3.1. SISTEMAS AISLADOS**

Se trata de sistemas de energía solar que se caracterizan por el uso de baterías, puesto que es necesario un sistema de acumulación que nos proporcione energía en las horas del día en las que la intensidad lumínica no sea suficiente para ofrecer la electricidad necesaria. Por esto, durante las horas de luz en las que se consume menos energía de la que se produce, la energía sobrante es la que debemos almacenar.

Los principales componentes que forman un sistema fotovoltaico aislado son:

- Generador fotovoltaico
- Inversor
- Sistema de acumulación (baterías de acumulación)
- Regulador de carga

### 3.1.1 El generador fotovoltaico.

Es el elemento captador de energía, que recoge la radiación solar y la transforma en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de paneles o módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, que deben proporcionar la energía necesaria para el consumo. La corriente que da un campo de paneles varía proporcionalmente a la irradiación solar. Como la irradiación solar varía en el tiempo debido a las condiciones climatológicas, la hora del día, etcétera, debemos contar con un acumulador de energía para disponer de energía durante cualquier instante.

Los módulos fotovoltaicos que forman el generador, están montados sobre una estructura mecánica capaz de sujetarlos y que está orientada para optimizar la radiación solar. [8]

Los valores óptimos son:

- 15 ° de inclinación, en condiciones normales
- 45° de inclinación en condiciones adversas

La cantidad de energía producida por un generador fotovoltaico varía durante el año en función de:

- La insolación de la localidad.
- La latitud.

Para cada aplicación, el generador tendrá que ser dimensionado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Carga eléctrica.
- Potencia de pico.
- Posibilidad de conexión a la red eléctrica.
- Latitud del lugar y radiación solar media anual del mismo.
- Características arquitectónicas específicas del edificio.
- Características eléctricas específicas de la carga.

Características:

- Los generadores fotovoltaicos funcionan de forma más eficiente a bajas temperaturas.
- Requieren de un mantenimiento mínimo preventivo (suciedad).



**Figura 3: Panel solar fotovoltaico**

### **3.1.2. Inversor.**

La electricidad que proporciona el sistema paneles-acumulador es continua, y se extrae a una tensión determinada, lo cual no siempre coincide con las exigencias de los equipos de consumo. Un convertidor continua-alterna (DC/AC), permite alimentar equipos que funcionen con corriente alterna. Si fuese necesario también se pueden usar convertidores continua-continua (DC/DC) que transformen la tensión continua de las baterías en tensión de alimentación también continua pero de distinto valor. A la hora de diseñar un sistema de comunicaciones que usa energía fotovoltaica es recomendable que todas las cargas trabajen a la tensión que suministran las baterías evitando el uso de convertidores.

Pero su función no es únicamente la de transformar la corriente continua, generada por los módulos fotovoltaicos, en corriente alterna con el voltaje y la frecuencia para poder ser traspasada a la red eléctrica (220V, 50 Hz), sino que además hace trabajar al campo fotovoltaico en el Maximum Power Point (MPP). Además supervisan la red de las posibles averías y cortar la conexión en caso de avería.

El inversor se debe escoger en función del tamaño de la instalación. Se debe tener en cuenta la potencia instalada en el inversor, y no Podemos optar por inversores incorporados a los propios módulos fotovoltaicos. Aunque hoy por hoy no resultan recomendados puesto que es necesario garantizar la calidad de la corriente alterna producida para conectarla a la red general, y por los posibles inconvenientes que se planteen en los trámites legales y administrativos para conseguir facturar una energía limpia vertida a la red.

Un inversor supone entre un 10 y un 15% del coste total de la instalación.

La bajada de los precios en las últimas décadas se explica debido a las innovaciones técnicas y el aumento de la producción.



**Figura 4: Convertidor DC/AC**



Dentro de los inversores podemos encontrar distintos tipos:

#### Inversor central

Utilizado para instalaciones con una potencia superior a 10kW. Se conectan en línea y a través de diodos en forma paralela.

Para este caso el generador está conectado en el lado de corriente continua. Tienen la ventaja de ofrecer un alto rendimiento.

El inconveniente se plantea cuando existe un fallo en el inversor central, pues esto obliga a una detención de toda la instalación.

#### Inversor String

Al igual que en el inversor central, el campo también se divide en líneas (strings).

Sin embargo cada string se une con un inversor string propio. De esta manera cada uno trabaja en el Maximum Power Point propio. Todo esto conlleva una mejora en las instalaciones puesto que se reducen pérdidas ocasionadas por strings y un cableado del generador en el lado de la corriente continua, la aparición de adaptaciones defectuosas también se evita. Por lo tanto se consigue un aumento del rendimiento y una máxima fiabilidad en la instalación.

### Inversor Multi-String

Permite la conexión y el funcionamiento en MPP de varios strings por medio de un convertidor de corriente continua en un elemento de potencia común y ofrece de esta manera una solución compacta y económica. Funciona con un coeficiente de rendimiento óptimo y es utilizado en instalaciones fotovoltaicas de potencia media de 3 a 10 kW.

### Inversor con módulos integrados

Cada módulo dispone de un inversor propio. Con lo cual no se produce ningún tipo de pérdidas por adaptación. El rendimiento en estos casos es algo menor que en el caso de usar strings. Necesitan un cableado mayor en el lado de alterna, ya que cada módulo debe estar conectado a la red de 220V.

Se utiliza en instalaciones con potencia de 50 a 400W.

Es conveniente incluir detrás del inversor un transformador para el aislamiento galvánico, un interruptor automático de desconexión que actúe como vigilante de tensión, puesto que la tensión puede dispararse fuera de los límites.[5]

### 3.1.3. Sistema de acumulación.

El sistema de acumulación se encarga de almacenar la energía producida por los paneles que no se consume inmediatamente para disponer de ella en periodos de baja o nula irradiación solar. La acumulación se realiza en forma de energía eléctrica mediante el uso de baterías, usualmente de plomo-ácido. Los acumuladores electroquímicos como las baterías de plomo-ácido también cumplen dos importantes misiones:

- Suministrar una potencia instantánea superior a la que el campo de paneles puede generar, necesaria para la puesta en marcha de algunos elementos (por ejemplo, el motor del frigorífico).
- Determinar el margen de tensiones de trabajo de la instalación.

Normalmente el banco de baterías y los módulos fotovoltaicos trabajan conjuntamente para alimentar las cargas.

Durante la noche toda la energía demandada por la carga la provee el banco de baterías. En horas tempranas de la mañana los módulos comienzan a generar, pero si la corriente que entregan es menor que la que la carga exige, la batería deberá contribuir en el aporte. A partir de una determinada hora de la mañana la energía generada por los módulos fotovoltaicos superada la energía promedio demandada. Los módulos no solo atenderán la demanda sino que además, todo exceso se almacenara en la batería que empezara a cargarse y a recuperarse de su descarga de la noche anterior. Finalmente durante la tarde, la corriente generada decrece y cualquier

diferencia con la demanda la entrega a la batería. En la noche, la generación es nula y todo el consumo lo afronta la batería.

Un sistema de acumulación está formado por un conjunto de acumuladores recargables, dimensionado de forma que garantice la suficiente autonomía de alimentación de la carga eléctrica. Las baterías que se utilizan con esta finalidad son acumuladores de tipo estacionario y sólo en casos muy especiales es posible utilizar baterías tipo automoción.



**Figura 5: Batería de plomo-ácido.**

Las baterías para uso fotovoltaico tienen que cumplir los siguientes requisitos:

- Bajo valor de autodescarga
- Larga vida útil
- Manutención casi nula
- Elevado número de ciclos de carga-descarga

#### **3.1.4. El regulador de carga.**

Asegura que la batería funcione en condiciones apropiadas, evitando la sobrecarga y sobredescarga de la misma, fenómenos ambos muy perjudiciales para la vida de la batería. El procedimiento que utiliza para ello es determinar el estado de carga de la batería a partir de la tensión a la que ésta se encuentra.

También genera alarmas en función del estado de dicha carga. Los reguladores actuales introducen microcontroladores para la correcta gestión de un sistema fotovoltaico. Su programación elaborada permite un control capaz de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permitiendo la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento para instalaciones especiales. Incluso los hay que memorizan datos que permiten conocer cuál ha sido la evolución de la instalación durante un tiempo determinado. Para ello, consideran los valores de tensión, temperatura, intensidad de carga y descarga, y capacidad del acumulador. Existen dos tipos de reguladores de carga, los lineales y los conmutados.

#### Regulación De La Intensidad De Carga De Las Baterías:

##### *Igualación*

Esta respuesta del regulador permite la realización automática de cargas de igualación de los acumuladores tras un período de tiempo en el que el estado de carga ha sido bajo, reduciendo al máximo el gaseo en caso contrario.

### *Carga profunda*

Tras la igualación, el sistema de regulación permite la entrada de corriente de carga a los acumuladores sin interrupción hasta alcanzar el punto de tensión final de carga. Alcanzado dicho punto el sistema de regulación interrumpe la carga y el sistema de control pasa a la segunda fase, la flotación.

Cuando se alcanza la tensión final de carga, la batería ha alcanzado un nivel de carga próximo al 90% de su capacidad, en la siguiente fase se completará la carga.

### *Carga final y flotación*

La carga final del acumulador se realiza estableciendo una zona de actuación del sistema de regulación dentro de lo que denominamos “Banda de Flotación Dinámica”. La BFD es un rango de tensión cuyos valores máximo y mínimo se fijan entre la tensión final de carga y la tensión nominal + 10% aproximadamente.

Una vez alcanzado el valor de voltaje de plena carga de la batería, el regulador inyecta una corriente pequeña para mantenerla a plena carga, esto es, inyecta la corriente de flotación.

Esta corriente se encarga por tanto de mantener la batería a plena carga y cuando no se consume energía se emplea en compensar la autodescarga de las baterías.[3]



Figura 6: Controlador de carga solar.

### 3.1.5. Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de los sistemas aislados de la red eléctrica son:

- Aplicaciones espaciales: Utilizado en los equipos electrónicos de satélites y naves espaciales.
- Sector de gran consumo: Calculadoras, relojes, etc.
- Telecomunicaciones: Existen multitud de equipos de telecomunicaciones situados en zonas de difícil acceso, alejados de la red eléctrica, alimentados por energía solar fotovoltaica. En estos casos, normalmente, la solución solar es la más económica y fiable. Son ejemplos característicos: repetidores de televisión, equipos de radio, antenas de telefonía móvil, etc...
- Señalización: La señalización marítima y terrestre es una de las grandes aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos. Así son numerosos los ejemplos en balizamiento de aeropuertos, señalización de carreteras y puertos, etc...

- Bombeo: En pozos alejados de la red eléctrica, para el bombeo. Estas instalaciones se adaptan muy bien a las necesidades ya que en los meses más soleados, que es normalmente cuando más agua se necesita, es cuando más energía se produce. En estos sistemas el almacenamiento de energía suele ser en forma de energía potencial, bombeando el agua a depósitos elevados.
- Zonas protegidas: En parajes naturales, donde por motivos de protección ambiental se recomienda no instalar tendidos eléctricos aéreos, en ocasiones, resulta más rentable utilizar sistemas fotovoltaicos en lugar de tendidos subterráneos o grupos electrógenos que utilizan combustibles fósiles.
- Electrificación de viviendas aisladas: Si la distancia del punto de consumo a la red eléctrica es excesiva.
- Alumbrado de calles y carreteras: La posibilidad de utilizar sistemas de iluminación autónomos de fácil instalación y mínima obra civil hace que sea una solución adecuada en muchas ocasiones.

### **3.2. SISTEMAS CONECTADOS A RED**

Los sistemas interconectados están permanentemente conectados a la red eléctrica nacional. En las horas de irradiación solar escasa o nula, cuando el generador fotovoltaico no produce energía suficiente para cubrir la demanda de electricidad, es la red la que proporciona la energía requerida. Viceversa, si durante las horas de



irradiación solar el sistema fotovoltaico produce más energía de la que gasta, ésta se vierte a la red. El usuario que invierte en una instalación de este tipo, sigue comprando la electricidad que consume a la distribuidora eléctrica al precio establecido, pero además se convierte en propietario de una instalación generadora de electricidad que puede facturar los kWh que produce.

Para que estas instalaciones sean técnicamente viables es necesario:

- La existencia de una línea de distribución eléctrica cercana con capacidad para admitir la energía producida por la instalación fotovoltaica.
- La determinación con la compañía distribuidora, del punto de conexión
- Proyectar un sistema que incluya equipos de generación y transformación de primera calidad, con las protecciones establecidas y debidamente verificados y garantizados por los fabricantes, de acuerdo a la legislación vigente.
- Una instalación realizada por un instalador especializado.

Los principales componentes que forman un sistema fotovoltaico “*grid connected*” son:

- Generador fotovoltaico
- Inversor para la conexión a red

- Protecciones del sistema
- Contador de energía bidireccional

### **3.2.1 El generador fotovoltaico**

Es el elemento captador de energía, que recoge la radiación solar y la transforma en energía eléctrica. Está formado por un conjunto de paneles o módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, que deben proporcionar la energía necesaria para el consumo. La corriente que da un campo de paneles varía proporcionalmente a la irradiación solar. Como la irradiación solar varía en el tiempo debido a las condiciones climatológicas, la hora del día, etcétera, debemos contar con un acumulador de energía para disponer de energía durante cualquier instante.

Los módulos fotovoltaicos que forman el generador, están montados sobre una estructura mecánica capaz de sujetarlos y que está orientada para optimizar la radiación solar.

Los valores óptimos son:

- 15 ° de inclinación, en condiciones normales
- 45° de inclinación en condiciones adversas

La cantidad de energía producida por un generador fotovoltaico varía durante el año en función de:

- La insolación de la localidad.
- La latitud.

Para cada aplicación, el generador tendrá que ser dimensionado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Carga eléctrica.
- Potencia de pico.
- Posibilidad de conexión a la red eléctrica.
- Latitud del lugar y radiación solar media anual del mismo.
- Características arquitectónicas específicas del edificio.
- Características eléctricas específicas de la carga.

Características:

- Los generadores fotovoltaicos funcionan de forma más eficiente a bajas temperaturas.
- Requieren de un mantenimiento mínimo preventivo (suciedad).



**Figura 7: Panel solar fotovoltaico**

### **3.1.2. Inversor.**

La electricidad que proporciona el sistema paneles-acumulador es continua, y se extrae a una tensión determinada, lo cual no siempre coincide con las exigencias de los equipos de consumo. Un convertidor continua-alterna (DC/AC), permite alimentar equipos que funcionen con corriente alterna. Si fuese necesario también se pueden usar convertidores continua-continua (DC/DC) que transformen la tensión continua de las baterías en tensión de alimentación también continua pero de distinto valor. A la hora de diseñar un sistema de comunicaciones que usa energía fotovoltaica es

recomendable que todas las cargas trabajen a la tensión que suministran las baterías evitando el uso de convertidores.

Pero su función no es únicamente la de transformar la corriente continua, generada por los módulos fotovoltaicos, en corriente alterna con el voltaje y la frecuencia para poder ser traspasada a la red eléctrica (220V, 50 Hz), si no que además hace trabajar al campo fotovoltaico en el Maximum Power Point (MPP). Además supervisan la red de las posibles averías y cortar la conexión en caso de avería.

El inversor se debe escoger en función del tamaño de la instalación. Se debe tener en cuenta la potencia instalada en el inversor, y no podemos optar por inversores incorporados a los propios módulos fotovoltaicos. Aunque hoy por hoy no resultan recomendados puesto que es necesario garantizar la calidad de la corriente alterna producida para conectarla a la red general, y por los posibles inconvenientes que se planteen en los trámites legales y administrativos para conseguir facturar una energía limpia vertida a la red.

Un inversor supone entre un 10 y un 15% del coste total de la instalación.

La bajada de los precios en las últimas décadas se explica debido a las innovaciones técnicas y el aumento de la producción.



**Figura 8: Convertidor DC/AC**

Dentro de los inversores podemos encontrar distintos tipos:

#### Inversor central

Utilizado para instalaciones con una potencia superior a 10kW. Se conectan en línea y a través de diodos en forma paralela.

Para este caso el generador está conectado en el lado de corriente continua. Tienen la ventaja de ofrecer un alto rendimiento.

El inconveniente se plantea cuando existe un fallo en el inversor central, pues esto obliga a una detención de toda la instalación.

#### Inversor String

Al igual que en el inversor central, el campo también se divide en líneas (strings).

Sin embargo cada string se uno con un inversor string propio. De esta manera cada uno trabaja en el Maximum Power Point propio. Todo esto conlleva una mejora en las instalaciones puesto que se reducen pérdidas ocasionadas por strings y un cableado del generador en el lado de la corriente continua, la aparición de adaptaciones defectuosas también se evita. Por lo tanto se consigue un aumento del rendimiento y una máxima fiabilidad en la instalación.

### Inversor Multi-String

Permite la conexión y el funcionamiento en MPP de varios strings por medio de un convertidor de corriente continua en un elemento de potencia común y ofrece de esta manera una solución compacta y económica. Funciona con un coeficiente de rendimiento óptimo y es utilizado en instalaciones fotovoltaicas de potencia media de 3 a 10 kW.

### Inversor con módulos integrados

Cada módulo dispone de un inversor propio. Con lo cual no se produce ningún tipo de pérdidas por adaptación. El rendimiento en estos casos es algo menor que en el caso de usar strings. Necesitan un cableado mayor en el lado de alterna, ya que cada módulo debe estar conectado a la red de 220V.

Se utiliza en instalaciones con potencia de 50 a 400W.

Es conveniente incluir detrás del inversor un transformador para el aislamiento galvánico, un interruptor automático de desconexión que actúe como vigilante de tensión, puesto que la tensión puede dispararse fuera de los límites.

Es conveniente incluir detrás del inversor un transformador para el aislamiento galvánico, un interruptor automático de desconexión que actúe como vigilante de tensión, puesto que la tensión puede dispararse fuera de los límites.

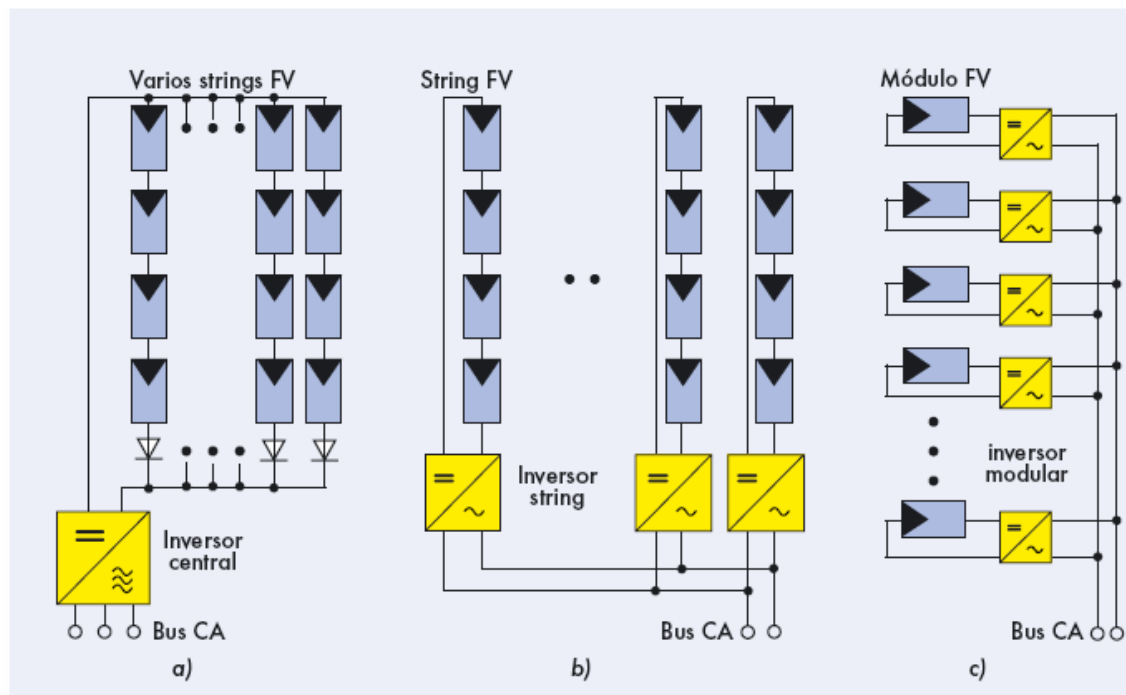


Figura 9. Esquema de una instalación fotovoltaica

### 3.2.3. El contador

El generador fotovoltaico requiere de dos contadores ubicados entre el inversor y la red. Uno de ellos utilizado para cuantificar la energía que se genera e inyecta en la red, para su posterior remuneración y otro para cuantificar el pequeño consumo ( $\ll 2$  KWh/año) del inversor fotovoltaico en ausencia de radiación solar así como garantía para la compañía eléctrica de posibles consumos que el titular de la cuenta pudiera hacer.



#### **3.2.4. El seguidor solar**

Existe la posibilidad de instalar un sistema de seguimiento solar. En condiciones ideales el rendimiento del sistema fotovoltaico puede mejorar en aproximadamente un 40%, pero el mayor coste y espacio que supone, puede no compensar el aumento que se consigue. [5]

#### **3.2.5. Los equipos de consumo o cargas.**

Son los equipos que se conectan al sistema y que consumen la energía del mismo (equipos de comunicaciones inalámbricas, enrutadores, estaciones de trabajo, iluminación, TVs, etcétera.).

Aunque no es posible saber con certeza absoluta cuál va a ser el consumo total de dichos equipos en operación es vital, para un cálculo correcto del sistema, hacer una buena estimación del mismo. Asimismo, hay que tener cuidado en elegir equipos eficientes, para no derrochar energía. Por ejemplo, en escenarios donde sea necesario dimensionar equipos de comunicaciones por energía solar debemos considerar equipos basados en arquitecturas de bajo consumo.

### 3.2.6 Aplicaciones.

Las principales aplicaciones de los sistemas conectados a la red eléctrica son:

- Tejados de viviendas: Son sistemas modulares de fácil instalación donde se aprovecha la superficie de tejado existente para sobreponer los módulos fotovoltaicos. El peso de los paneles sobre el tejado no supone una sobrecarga para la mayoría de los tejados existentes. Una instalación de unos 3 kWp que ocupa cerca de 30 m<sup>2</sup> de tejado, inyectaría a la red tanta energía como la consumida por la vivienda a lo largo del año.

Para ofrecer una solución más económica se están utilizando sistemas prefabricados que reducen notablemente el tiempo de realización de la instalación y aumentan su fiabilidad. Una vez terminada la instalación, el sistema fotovoltaico es un elemento más de la vivienda, aportando una fuente adicional de producción de electricidad y un gran valor ecológico añadido.

Por sus características y la actual reglamentación en España, se prevé que sea la aplicación más extendida en los próximos años.

- Integración en edificios: En esta aplicación es prioritario el nivel de integración del elemento fotovoltaico en la estructura del edificio. Por integración fotovoltaica debemos entender la sustitución de elementos arquitectónicos convencionales por nuevos elementos arquitectónicos que incluyen el elemento fotovoltaico, y que por lo tanto son generadores de energía.

Tanto para aplicaciones aisladas de la red eléctrica, como para las conectadas a ella es necesario cuidar la incorporación de los sistemas fotovoltaicos al entorno, rural o urbano. Pero es en las aplicaciones urbanas conectadas red, en las que se unen exigencias urbanísticas a las motivaciones medioambientales, donde la integración tiene más relevancia. La demanda de energía del sector terciario en la Unión Europea está creciendo de forma significativa, por lo que la integración de sistemas fotovoltaicos en edificios, con aportaciones energéticas en las horas punta, contribuye reducir la producción diurna de energía convencional.

Las aplicaciones de integración en edificios más frecuentes:

- Recubrimiento de fachadas
- Muros cortina
- Parasoles en fachada
- Pérgolas
- Cubiertas planas acristaladas
- Lucernarios en cubiertas
- Lamas en ventanas
- Tejas

Para conseguir una mejor integración del elemento fotovoltaico en los edificios es necesario tenerlo en cuenta desde el inicio del diseño del edificio. De esta manera se podrá conseguir mejorar el aspecto exterior y el coste del edificio al poderse sustituir elementos convencionales por los elementos fotovoltaicos .A veces es necesario sacrificar parte del rendimiento energético por mantener la estética del edificio. [3]

# **CAPÍTULO 4**

## **GENERADOR FOTOVOLTAICO**

## 4. GENERADOR FOTOVOLTAICO.

La transformación directa de la energía solar en energía eléctrica se realiza en un equipo llamado generador fotovoltaico que está formado por un conjunto de módulos o paneles fotovoltaicos. Los módulos o paneles solares son placas rectangulares formadas por un conjunto de celdas o células fotovoltaicas protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizado.

El principio de funcionamiento está basado en el efecto fotovoltaico y se trata de la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica. El fenómeno físico que se produce es debido a la interacción de la radiación luminosa proveniente del Sol con los electrones situados en materiales semiconductores.

La conversión se realiza en la célula solar. Se trata de un dispositivo formado por una lámina de un material semi-conductor. En la mayoría de los casos este material suele ser silicio.

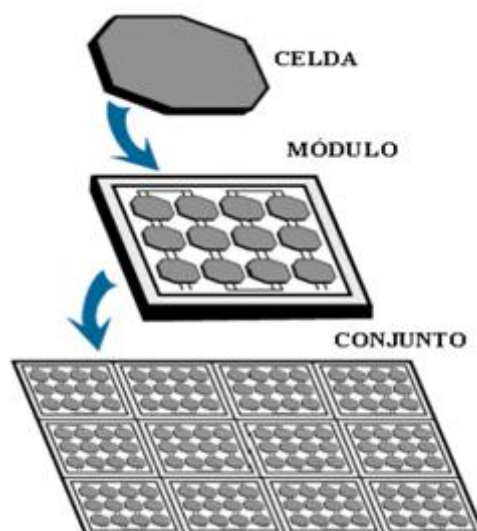


Figura 9. Panel fotovoltaico.

## 4.1. CÉLULA FOTOVOLTAICA

La célula o celda fotovoltaica es el componente que capta la energía contenida en la radiación solar y la transforma en una corriente eléctrica basándose en el efecto fotovoltaico que produce una corriente eléctrica cuando la luz incide sobre algunos materiales.

Las celdas fotovoltaicas están hechas principalmente de un grupo de minerales semiconductores, de los cuales el silicio, es el más usado. El silicio se encuentra abundantemente en todo el mundo porque es un componente mineral de la arena. Sin embargo, tiene que ser de alta pureza para lograr el efecto fotovoltaico, lo cual encarece el proceso de la producción de las celdas fotovoltaicas.

Una celda fotovoltaica tiene un tamaño de 10 por 10 centímetros y produce alrededor de un vatio a plena luz del día. Normalmente las celdas fotovoltaicas son color azul oscuro. La mayoría de los paneles fotovoltaicos consta de 36 celdas fotovoltaicas.

Las dimensiones de la célula suelen ser de un grosor que varía entre los 0.25 y los 0.35 mm. Su superficie suele ser de aproximadamente unos 100 cm<sup>2</sup>.

Para la realización de las células, el material actualmente más utilizado es el mismo silicio utilizado por la industria electrónica, cuyo proceso de fabricación presenta costes muy altos, no justificados por el grado de pureza requerido para la fotovoltaica, que son inferiores a los necesarios en electrónica.

Otros materiales para la realización de las células solares son:

- Silicio Mono-cristalino: de rendimiento energético hasta 15 - 17 %;
- Silicio Poli-cristalino: de rendimiento energético hasta 12 - 14 %;
- Silicio Amorfo: con rendimiento energético menor del 10 %;
- Otros materiales: Arseniuro de galio, diseleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio;

Actualmente, el material más utilizado es el silicio mono-cristalino que presenta prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin.

Presentado normalmente como arena, mediante métodos adecuados, se obtiene el silicio en su forma pura. El cristal de silicio puro no posee electrones libres y por lo tanto resulta un mal conductor eléctrico. Para cambiar esto se le agregan porcentajes de otros elementos. Este proceso se denomina dopado. Mediante el dopado de silicio con fósforo se obtiene un material con electrones libres o material con portadores de carga negativa (silicio tipo N). Realizando el mismo proceso, pero agregando Boro en lugar de fósforo, se obtiene un material de características inversas; esto es déficit de electrones o material con cargas positivas libres o huecos (silicio tipo P).

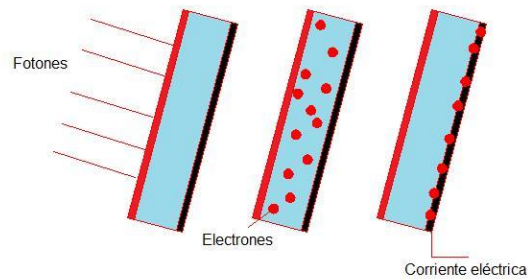
Cada celda solar se compone de una delgada capa de material tipo N y otra de mayor espesor de material tipo P.

Ambas capas separadas son eléctricamente neutras, pero al ser unidas, justamente en la unión (P-N), se genera un campo eléctrico debido a los electrones libres del silicio tipo N que ocupan los huecos de la estructura del silicio tipo P.

Al incidir la luz sobre la celda fotovoltaica, los fotones que la integran chocan con los electrones de la estructura del silicio dándoles energía y transformándolos en conductores. Debido al campo eléctrico generado en la unión (P-N), los electrones son orientados, fluyendo de la capa "P" a la capa "N". Mediante un conductor externo, se conecta la capa negativa a la positiva, generándose así un flujo de electrones (corriente eléctrica) en la conexión.

Mientras la luz siga incidiendo en la celda, el flujo de electrones se mantendrá. La intensidad de la corriente generada, variará proporcionalmente según la intensidad de luz incidente. Cada módulo fotovoltaico se conforma de una determinada cantidad de celdas conectadas en serie. Como vimos anteriormente, al unirse la capa negativa de una celda a la positiva de la siguiente, los electrones fluyen a través de los conductores de una celda a la otra. Este flujo se repite hasta llegar a la última celda del módulo, de la cual fluyen hacia el acumulador o batería. Cada electrón que abandona el módulo es reemplazado por otro que regresa del acumulador o batería. El cable de la interconexión entre módulo y batería contiene el flujo, de manera tal que cuando un electrón abandona la última celda del módulo y se dirige hacia la batería, otro electrón ingresa a la primera celda desde la batería. Es por esto que se considera inagotable a un dispositivo fotovoltaico. Produce energía eléctrica como respuesta a la energía lumínica que ingresa en el mismo. Cabe aclarar que una celda fotovoltaica no puede almacenar energía eléctrica. [4]





**Figura 10. Funcionamiento célula fotovoltaica.**

#### **4.1.1 Tecnologías de células fotovoltaicas.**

Existen diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales empleados, los métodos de fabricación que se empleen y la forma final. A continuación se describen los materiales que pueden formar las células solares:

- Silicio Puro monocristalino:

Son células formadas por un solo tipo de cristal, son bastante caras y difíciles de conseguir. A pesar de eso, consiguen unos rendimientos muy buenos, los más grandes, superiores al 30%.

Todos los átomos están perfectamente ordenados. En el proceso de cristalización al ir depositándose los átomos sobre el cristal ya formado lo hacen siempre respetando el orden. El color que presentan es muy monocromático: azulado, oscuro con un cierto brillo metálico.

La célula de monocristalino de silicio es la más usada y es comercializada como el conversor directo de energía solar en electricidad; la tecnología utilizada para la producción de este, es mediante el siguiente procedimiento; La producción de la célula de silicio empieza con la extracción del silicio o cristal del dióxido.

Este material se desoxida en los grandes hornos, purificado y solidificado. Este proceso alcanza un grado de pureza en 98 y 99% lo que es bastante bueno bajo el punto de vista de energía y costo. Este silicio es trabajado para células fotovoltaicas y otros semiconductores y de un alto grado de pureza, donde el más grande debe llegar a 99.9999%.

Para usar el silicio en la industria electrónica además del alto grado de pureza, el material debe ser de estructura monocristalina y de densidad baja. El proceso más utilizado se denomina “proceso Czochralski”. El silicio se funde junto con una cantidad pequeña de otro elemento, generalmente Boro y a altas temperaturas; luego va extrayéndose ligeramente del material fundido un gran cilindro de monocristalino de silicio. Este cilindro está cortado en partes o rodajas de aproximadamente 300mm.

Después del corte y limpiezas de lodos de las rodajas, debe introducirse nuevamente para obtener la unión. Terminado este proceso las rodajas de silicio se exponen en el vapor en un horno donde la temperatura varía entre 800 a 1000°C.

Entre las células fotovoltaicas que tienen como base el silicio, los que tienen como base los monocristalinos tienen mayor eficacia. Las fotocélulas comerciales obtuvieron con el proceso descrito una eficacia de aproximadamente 15% podría llegar a 18% en células hechas en laboratorios.



**Figura 11. Módulo compuesto por células de silicio monocristalino.**

- Silicio puro policristalino:

Formado por la agrupación de cristales de silicio donde las direcciones de alineamiento de los átomos cambian cada cierto tiempo durante el proceso de deposición. Tienen el aspecto de una amalgama de cristales de distintos tonos azulados y grises con brillo metálico.

Las células de policristalino de silicio son más baratas que las de silicio monocristalino porque ellos exigen un proceso de reparación menos riguroso de las células. Su eficacia, sin embargo, es menor en comparación a las células de monocristalino de silicio. El proceso de pureza del silicio usado en la producción de las células de policristalino de silicio es similar al proceso de monocristalino, lo que permite obtener niveles de eficacia compatibles. Básicamente las técnicas de producción de células de policristalino son los mismos, sin embargo el proceso es menos riguroso.

Ellos pueden prepararse para el corte de un lingote, de cintas o depositando una película en un sustrato, tanto para el transporte de vapor en cuanto a la inmersión.

Cada técnica produce cristales con las características específicas, incluso el tamaño, la morfología y la concentración de los. A lo largo de los años, el proceso de la producción ha tenido una eficacia máxima alcanzando el 12.5% en las balanzas industriales.



**Figura 12. Módulo formado por células de silicio policristalino.**

Por las características físicas del silicio cristalizado, los paneles fabricados siguiendo esta tecnología presentan un grosor considerable. Mediante el empleo del silicio con otra estructura o de otros materiales semiconductores es posible conseguir paneles más finos y versátiles que permiten incluso en algún caso su adaptación a superficies irregulares. Son los denominados paneles de lámina delgada.

Así pues, los tipos de paneles de lámina delgada son:

- Silicio amorfo. (TFS)

Una célula de silicio amorfo difiere de las otras estructuras cristalinas por el grado de desorden presentado en la estructura de sus átomos. El aspecto es de tonos color marrón y gris-oscuro. Es el silicio típico de las calculadoras y otros pequeños objetos con funciones muy diversas.

El uso de silicio amorfo en las fotocélulas ha mostrado grandes ventajas en las propiedades eléctricas y en el proceso de la producción. Por presentar una gran absorción de la radiación solar en la lámina, podría ser fabricado por la deposición de varios tipos de sustrato.

El silicio amorfo viene mostrando una tecnología fuerte para los sistemas fotovoltaicos de bajo costo. Asimismo presenta un costo reducido en la producción, por lo que el uso de silicio amorfo tiene dos desventajas: la primera es su baja conversión comparada a las células monocristalinas y policristalinas de silicio; segundo, las células son pronto afectadas por un proceso de degradación en los primeros meses de funcionamiento, reduciendo como a eficacia a lo largo de la vida útil.

Por otro lado, el silicio amorfo presenta ventajas que compensan las deficiencias dichas anteriormente, ellas son: el proceso de su producción es relativamente simple y barato; la posibilidad de producción de células a gran escala; y el bajo consumo de energía en la producción.



**Figura 13. Módulo formado por células de silicio amorfo.**

- Teluro de cadmio.

La tecnología del telurio de cadmio (CdTe), gracias a las importantes mejoras realizadas en los últimos años, es capaz de producir módulos en grandes volúmenes y a bajo coste, convirtiendo en realidad el objetivo de lograr una electricidad fotovoltaica asequible y al alcance de todos.

Una tecnología fotovoltaica asequible, en grandes volúmenes, permite aumentar considerablemente la contribución de la energía solar fotovoltaica al objetivo de seguridad de suministro y a la lucha contra el cambio climático.

Algunas de las ventajas de esta tecnología son:

- Mayor absorción de la irradiación solar difusa, en condiciones de alta nubosidad y como al amanecer o al anochecer, teniendo como resultado una

mayor producción de energía en comparación con los módulos tradicionales de silicio.

- Mejor rendimiento a altas temperaturas, alcanzadas en nivel normal bajo irradiación solar directa, en comparación con los módulos tradicionales de silicio.
- Mayor idoneidad para la producción de módulos en grandes volúmenes y a bajo coste.
- Captura eficaz de cadmio, en forma de compuesto estable, durante décadas.
- Periodo de recuperación energético más corto entre toda las tecnologías fotovoltaicas existentes.
- Menor huella e carbono entre todas las tecnologías fotovoltaicas actuales, en el cómputo del ciclo de vida.

Las características físicas del CdTe le hacen coincidir casi perfectamente con el espectro solar. Esto permite a los módulos de CdTe absorber mayor cantidad de la energía solar disponible en situaciones de luz escasa o difusa, como al amanecer y al anochecer y bajo cielos nubosos, y convertirla en electricidad de forma más eficiente que los paneles convencionales. Como resultado, los módulos de capa fina de CdTe producirán, por lo general, más electricidad bajo condiciones reales que los módulos solares convencionales.



**Figura 14. Paneles solar fabricado con telurio de cadmio.**

- Arseniuro de Galio.

El arseniuro de galio es uno de los materiales más eficientes, ya que presenta unos rendimientos en laboratorio del 25,7% siendo los comerciales del 20%.

En comparación con el silicio, los semiconductores como el arseniuro de galio se pueden incorporar en células solares que convierten más luz solar en electricidad y en transistores que son más rápidos que sus respectivos de silicio. Sin embargo los dispositivos fabricados con estos materiales son caros.

Recientemente, un nuevo método para la fabricación de dispositivos de gran superficie de arseniuro de galio promete reducir los costes mediante la eliminación de pasos de fabricación y desperdiciando menos material.



Las células solares de arseniuro de galio convierten el doble de la energía presente en la luz del sol en electricidad en comparación con las células de silicio. El arseniuro de galio también se encuentra en el punto de mira de los fabricantes de microchips como Intel como un reemplazo potencial para el silicio.

El problema con el arseniuro de galio, sin embargo, es su precio. Actualmente, para hacer un panel solar de arseniuro de galio, los fabricantes hacen crecer un cristal semiconductor en una cara plantilla en una cámara de alto vacío y alta temperatura. El arseniuro de galio es entonces cortado en pedazos finos, ensamblado, y enlazado. Este proceso destruye la plantilla subyacente, la cual es necesaria para crear un cristal de alta calidad. Además, haciendo sólo una única capa de arseniuro de galio en un mismo momento es ineficiente--toma más tiempo cargar y descargar la cámara de vacío del que toma hacer crecer el cristal.

El arseniuro de galio (GaAs) es un semiconductor cuyo ordenamiento cristalino se denomina estructura "zinc-blende" similar a la estructura diamante y del Si cristalino pero con dos átomos diferentes por celda unidad del cristal.

Sus propiedades electrónicas permiten lograr celdas con mayor eficiencia de conversión. En particular, poseen un "gap" más apropiado y un coeficiente de absorción de la radiación solar más elevado.

Como el "gap" del GaAs está cerca del ideal y dado su desarrollo tecnológico, las celdas solares con mayor eficiencia están realizadas a partir de este material.

En condiciones terrestres se alcanzaron eficiencias superiores al 27%, mientras que con estructuras más complicadas tipo tandem (GaAs/GaSb) se obtuvieron eficiencias de 35% bajo iluminación concentrada (100X).

Dado que el GaAs es un semiconductor de “gap” directo, la luz es absorbida muy cerca de la superficie del dispositivo, necesitando unos pocos micrones de espesor para la fabricación de una celda.

Como desventajas se pueden mencionar la escasez del galio en la naturaleza, lo que hace que el GaAs sea un material costoso, y la toxicidad del arsénico involucrado en la fabricación. Por ello es importante estudiar cuidadosamente las consecuencias ambientales de la instalación de grandes sistemas solares basados en este semiconductor.

La formación del arseniuro de galio se realiza en un horno en el cual se colocan el Ga y el As en distintas naves y a distintas temperaturas ( $\approx 1238^{\circ}\text{C}$  y  $610^{\circ}\text{C}$ , respectivamente).

Se transporta el vapor de As en cantidad controlada hacia el Ga, formando GaAs. En general, en este proceso se obtiene un material policristalino. Este policristal puede ser recristalizado por distintas técnicas y obtener GaAs monocristalino. Los dopantes utilizados comúnmente para el GaAs son Zn y Cd, tipo p, y Te, Se, S y Sn como dopante tipo n. La formación de la juntura en el GaAs se realiza mediante crecimiento epitaxial en lugar de por difusión de dopantes.

La tecnología del GaAs ha sido bien desarrollada ya que tiene un interés comercial para la fabricación de LEDs (“light-emitting diode”) y en láseres de semiconductores. Otro aspecto en esta tecnología ha sido la utilización de aleaciones de GaAs y AlAs. Este último material tiene una estructura similar al GaAs con un “gap” indirecto ( $E_g \approx 2,2$  eV), y un parámetro de red similar, que solo difiere en 0,14 %. Este tipo de aleaciones, denominadas generalmente como  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  (donde  $x$  es la proporción de Al), tienen un parámetro de red y un “gap” intermedio entre el GaAs y el AlAs. Debido a esta similitud entre los parámetros de red, las heterojunturas entre GaAs, AlAs y  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  tienen baja densidad de defectos en las interfaces, y consecuentemente, están cerca de las propiedades ideales. [6]



**Figura 15. Panel solar de arseniuro de galio.**

- CIS/CIGS (Cobre, indio, galio y selenio)

La técnica consiste en calentar y depositar un material semiconductor que contiene cobre, galio, indio y selenio sobre un soporte, utilizando una técnica de evaporación al vacío llamado co-evaporación, que es costosa y lleva mucho tiempo.

Estas nuevas técnicas utilizan metales raros, como indio, cuya producción mundial es de 25 toneladas por año y el precio a fecha de abril del 2007 es de 1.000 dólares por

kg; el telurio , cuya producción mundial es de 250 toneladas al año; el galio con una producción de 55 toneladas al año y el germanio con una producción de 90 toneladas al año. Aunque las cantidades de estas materias primas necesarias para la fabricación de células fotovoltaicas son infinitesimales, un desarrollo masivo de módulos fotovoltaicos debería tener en cuenta esta disponibilidad limitada.

## **4.2. MÓDULO FOTOVOLTAICO**

Las células fotovoltaicas constituyen un producto intermedio, son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin un soporte mecánico. Se ensamblan de la manera adecuada para formar una única estructura: el módulo fotovoltaico, que es una estructura sólida y manejable. El número de células de un módulo depende de la estructura cristalina del semiconductor usado. Este conjunto es encapsulado de forma que quede protegido de los agentes atmosféricos que puedan afectar cuando esté trabajando a la intemperie, dándole a su vez rigidez mecánica y aislándole eléctricamente del exterior.

### **4.2.1 partes de los módulos fotovoltaicos**

- Cubierta frontal.

Ha de poseer una elevada transmisión en el rango de longitudes de onda que puedan ser aprovechadas por una célula solar fotovoltaica (350 a 1200 nm en caso de

células de silicio), y una baja reflexión de la superficie frontal, para aprovechar al máximo la energía solar incidente. Además, el material ha de ser impermeable al agua, deberá tener una buena resistencia al impacto, deberá ser estable a la exposición prolongada de rayos UV y contará con una baja resistividad térmica. Si se diera el caso de que penetrara agua en el interior del módulo, ésta corroería los contactos metálicos contribuyendo a reducir drásticamente la vida útil del módulo. En la mayoría de los módulos la superficie frontal se utiliza para dar rigidez y dureza mecánica al mismo.

Entre los materiales para la superficie frontal más empleados podemos encontrar acrílicos, polímeros y cristal. El más empleado suele ser el cristal templado con bajo contenido en hierro por sus características de bajo coste, elevada transparencia y estabilidad, impermeabilidad al agua y los gases y buenas propiedades de autolimpiado.

- Encapsulante.

Se utiliza para dar adhesión entre las células solares, la superficie frontal y la posterior del módulo. Deberá ser impermeable al agua y resistente a la fatiga térmica y la abrasión. El más utilizado es el EVA (etilen-vinil-acetato).

- Cubierta posterior.

Debe ser impermeable y con baja resistencia térmica. Normalmente se utiliza una película de Tedlar adosada en toda la superficie del módulo, aunque también existen modelos que emplean una nueva capa de Tedlar y un segundo vidrio.

- Células solares.

Las cintas de interconexión eléctrica suelen ser de aluminio o acero inoxidable, y se sueldan de forma redundante, con dos conductores paralelos para aumentar la recolección de portadores en ambas caras de la célula.

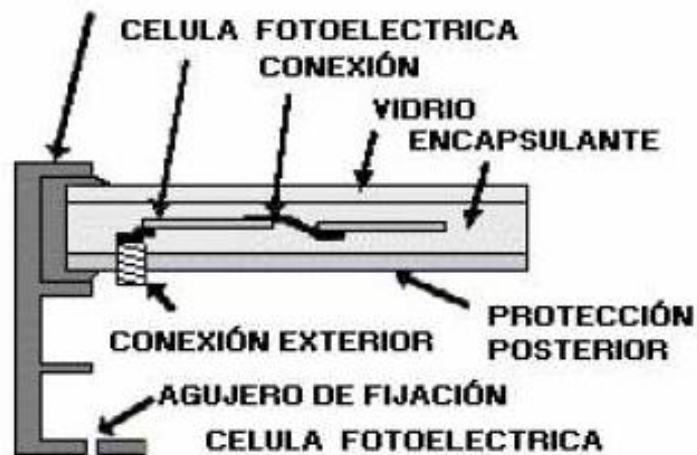


Figura 16. Sección transversal de un módulo fotovoltaico.

Los bordes del bloque así laminado se protegen de la posible exfoliación con una junta de neopreno, y todo el conjunto va incrustado en un marco de aluminio adherido normalmente con silicona, que le proporciona resistencia mecánica y está preparado para permitir su instalación y ensamblaje en cualquier estructura . Se incorpora también una caja de conexiones externa (normalmente adherida con silicona a la parte posterior) que cuenta con dos bornes de salida positiva y negativa, para permitir el conexionado de módulos. Éste ha de ser de cierre hermético y

resistente a la intemperie para proteger las conexiones del módulo, y en algunos casos lleva incorporados diodos de protección.

El tiempo de vida útil de los módulos debe ser superior a los 20 años, y el sistema ha de ser fiable incluso en las condiciones climatológicas más adversas. Para poder predecir esta fiabilidad a tan largo plazo, los módulos son sometidos a ensayos de cualificación de sus características eléctricas (como haremos en nuestro proyecto) y físicas. Algunos fabricantes poseen su propio Sistema de Aseguración de Calidad y realizan algunos de estos ensayos en muestras obtenidas de sus cadenas de producción, no obstante, existen normativas nacionales e internacionales de homologación de módulos fotovoltaicos que, si bien no son de obligado cumplimiento, son de una excelente garantía de durabilidad.[6]

#### **4.2.2. Tipos de paneles según su forma.**

Empleando cualquiera de los materiales antes comentados se fabrican módulos fotovoltaicos para adaptarse a una aplicación en concreto o para lograr un mayor rendimiento.

Algunos ejemplos de formas de paneles distintos del clásico plano son:

- Planos con sistema de concentración.

Esta tecnología emplea una serie de superficies reflectantes, como son los espejos, metales, plásticos, que mediante una geometría de tipo paraboloide son

capaces de dirigir la radiación solar recogida en una superficie a otra muy inferior concentrando la luz solar sobre las células solares. Estos sistemas de concentración hacen que una célula de menor tamaño que la de un panel plano clásico tenga el mismo rendimiento, ya que recibe una cantidad concentrada de radiación solar. Esto supone una disminución del precio del panel ya que los materiales reflectantes son mucho más baratos que las células solares, y ésta tecnología reduce el contenido de silicio en el panel.

La tecnología de concentración únicamente utiliza la energía directa (aquella que se sabe de dónde viene) por lo que el sistema debe contar además con un sistema de seguimiento solar en dos ejes, que consta de un soporte para los módulos y mediante unas sondas y una configuración adecuada se desplaza en dos ejes para que los módulos fotovoltaicos instalados en él encuentren siempre los rayos del sol perpendicularmente.



**Figura 17. Plano con sistema de concentración.**



- Paneles de formato “teja o baldosa”.

Estos paneles son de pequeño tamaño y están pensados para combinarse en gran número para así cubrir las grandes superficies que ofrecen los tejados de las viviendas. Aptos para cubrir grandes demandas energéticas en los que se necesita una elevada superficie de captación.



**Figura 18. Módulo fotovoltaico de tipo “teja o baldosa”.**

- Paneles bifaciales.

Basados en un tipo de panel capaz de transformar en electricidad la radiación solar que le recibe por cualquiera de sus dos caras. Para aprovechar convenientemente esta cualidad se coloca sobre dos superficies blancas que reflejan la luz solar hacia el reverso del panel.



**Figura 19. Panel bifacial.**

#### **4.2.3. Curva característica.**

La curva característica corriente-tensión es la representación estándar de un dispositivo fotovoltaico. La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico bajo unas condiciones ambientales determinadas (radiación solar incidente y temperatura ambiente). El punto en concreto de corriente y voltaje en el que el dispositivo fotovoltaico trabajará vendrá determinado por la carga a la que esté conectado.

Todo panel fotovoltaico, como generador tiene una curva característica derivada de la curva característica de la célula fotovoltaica. Para poder comprender la

curva veamos, primero, el circuito y la ecuación que relaciona ambas magnitudes que se deriva del mismo:

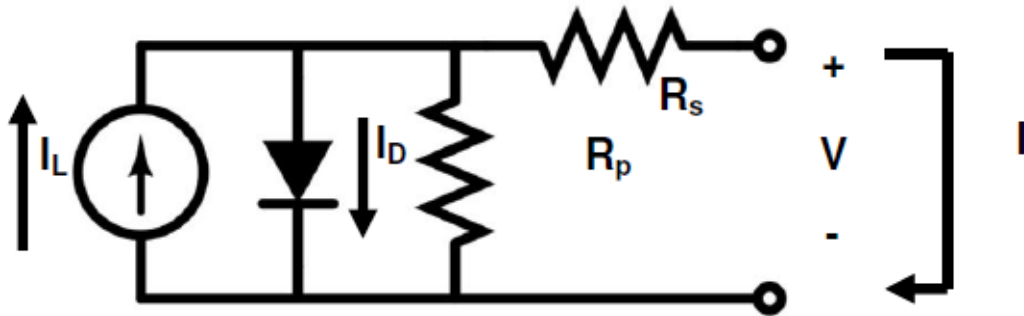


Figura 20. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica.

En el circuito equivalente vemos una fuente, que es la que proporciona la energía; un diodo que simboliza la unión p-n de la misma y las resistencias y serie y paralelo asociadas. La ecuación que se obtiene del circuito equivalente para relacionar las magnitudes es:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

Donde:

$I_L$  es la corriente fotogenerada;

$I_0$  es la corriente inversa de saturación del diodo;

$V_t$  es el voltaje térmico ( $V_t = KT/e$ , siendo K la constante de Boltzman, T la temperatura en grados Kelvin y e la carga del electrón);

- $m$  es el factor de idealidad del diodo;  
 $R_s$  es la resistencia serie;  
 $R_p$  es la resistencia paralelo;

Para el caso de un módulo FV, su característica eléctrica dependerá del número de células en serie y paralelo que posea. Si suponemos que todas las células constituyentes de un módulo fueran iguales, la corriente generada por el módulo sería igual a la corriente de la célula multiplicada por el número de células en paralelo, y el voltaje sería igual al voltaje de la célula multiplicado por el número de células en serie:

$$I_{\text{mod}} = I_c * N_p \quad (2)$$

$$V_{\text{mod}} = V_c * N_s \quad (3)$$

Donde  $N_p$  y  $N_s$  son respectivamente el número de células en paralelo y en serie que contiene el módulo que empleamos como ejemplo en la siguiente figura.

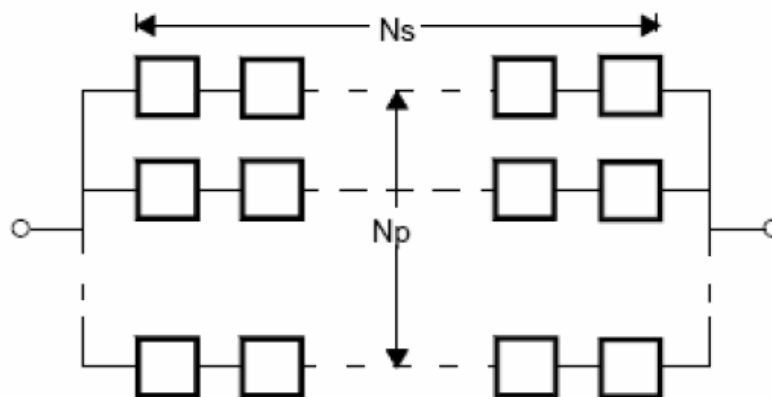


Figura 21. Esquema de conexión eléctrica en un módulo fotovoltaico

Teniendo esto en cuenta, si combinamos las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtendría, para la curva característica de un módulo fotovoltaico formado por células iguales y con relación a los parámetros de la célula:

$$I = N_p \cdot (I_L - I_0 \cdot (\exp(\frac{V}{N_s \cdot V_t} + \frac{I \cdot R_s}{N_p}) - 1) - \frac{V}{N_s \cdot V_t} - \frac{I \cdot R_s}{N_p})$$

Esta ecuación muestra el mismo comportamiento que la característica I-V de una célula, y de hecho en la práctica, cuando hablamos de la ecuación característica y los parámetros fundamentales de un módulo fotovoltaico, no se suele hacer referencia a su relación con la célula solar sino que se escribe la ecuación (1) con todos los parámetros característicos ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $m$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ) del módulo.

El comportamiento de una célula fotovoltaica ideal se grafica de este modo:

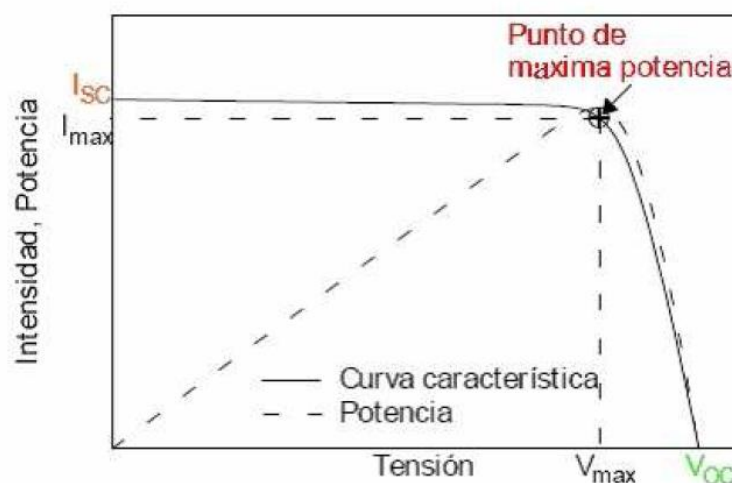


Figura 22. Curva característica de una célula fotovoltaica.

Los principales elementos de los que está compuesta la curva característica son los siguientes:

Corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$  notación española,  $I_{sc}$  notación internacional).

Es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero. La unidad de medición es el amperio. Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa.

Voltaje de circuito abierto ( $V_{ca}$  notación española,  $V_{oc}$  notación internacional).

Es el máximo voltaje del dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero. Su unidad de medición es el voltio.

Potencia máxima ( $P_{max}$ ).

Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V.

Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{pmp}$ ).

Es el valor de la corriente para  $P_{max}$  en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.

### Voltaje en el punto de máxima potencia (V<sub>pmp</sub>).

Es el valor de voltaje para P<sub>max</sub> en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.

### Factor de forma (FF).

Es el valor correspondiente al cociente entre P<sub>max</sub> y el producto de I<sub>sc</sub> y V<sub>oc</sub>. Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1, siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil de cuadrado, no real. Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Generalmente las células dentro del módulo fotovoltaico se asocian en serie, con el fin de obtener unos valores de voltaje más apropiados para su conexión a distintas cargas o a una batería (el voltaje de una célula estándar suele ser de unos 0.6V). El voltaje total del módulo dependerá, por tanto, del número de células asociadas en serie.

Por el contrario, la corriente que podemos obtener del módulo fotovoltaico va a depender básicamente del tipo y tamaño de células (suponiendo que no haya células conectadas en paralelo en el interior del módulo).[6]

# **CAPÍTULO 5**

## **MÉTODOS DE TRASLACIÓN DE CURVAS**



## 5. MÉTODOS DE TRASLACIÓN DE CURVAS.

Para corregir a otras condiciones de temperatura e irradiancia las características corriente-tensión medidas, pueden aplicarse tres procedimientos regulados por la norma *UNE-EN 60891* en la que se explican los pasos que deberían seguirse para el correcto cálculo de las curvas características I-V medidas de dispositivos fotovoltaicos.

Para los dos primeros es necesario conocer los parámetros de corrección del dispositivo fotovoltaico y el tercero es un método de interpolación que no necesita parámetros de corrección como entrada.

### 5.1. PROCEDIMIENTO 1.

Para la corrección de la característica corriente-tensión en este primer procedimiento hay aplicar las siguientes ecuaciones:

$$I_2 = I_1 + I_{sc} \cdot \left( \frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_s \cdot (I_2 - I_1) - k \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Donde:

- $I_1, V_1$  son coordenadas de los puntos de la curva característica medida;
- $I_2, V_2$  son coordenadas de los puntos de la curva característica corregida;
- $G_1$  es la irradiancia medida con el dispositivo de referencia;
- $G_2$  es la irradiancia deseada;
- $T_1$  es la temperatura medida en el dispositivo bajo ensayo;
- $T_2$  es la temperatura deseada;
- $I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito medida del dispositivo bajo ensayo para  $T_1$  y  $G_1$ ;
- $\alpha, \beta$  son los coeficientes de temperatura de corriente y tensión;
- $R_s$  es la resistencia interna serie del dispositivo;
- $k$  es el factor de corrección de la curva.

Como se ha mencionado anteriormente, para aplicar este procedimiento de corrección es necesario conocer los parámetros de corrección de la curva que son:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_s$  y  $k$ .

Los valores de los coeficientes de temperatura que se van a usar son estándar y son los siguientes:

$$\alpha = 1,5 \text{ mA/}^\circ\text{C}$$

$$\beta = -2,3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

Por lo que para poder aplicar las ecuaciones (1) y (2) y obtener la curva corregida deseada, va a ser necesario calcular los parámetros  $R_s$  y  $k$ .

### 5.1.1. Determinación de la resistencia interna serie $R_s$ .

Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico se parte de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante y distintas irradiancias.

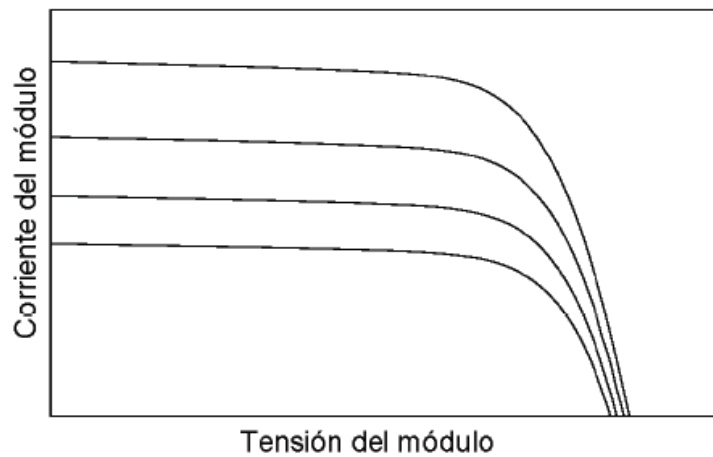


Figura 23. Curvas características a temperatura constante.

A continuación, haciendo uso de las ecuaciones (1) y (2) y con  $R_s=0 \Omega$  se trasladan las curvas de menor irradiancia a la de mayor.

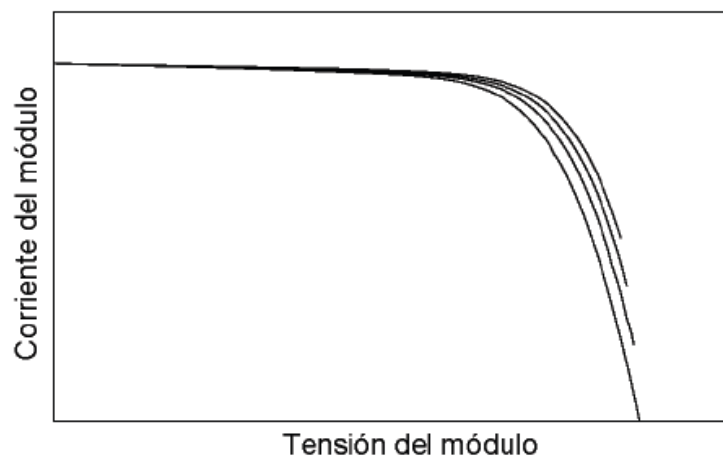


Figura 24. Curvas características trasladadas a la de mayor irradiancia.

Para hallar el valor correcto de  $R_s$  hay que incrementar su valor en pasos de  $10 \text{ m}\Omega$  hasta que la desviación de su potencia máxima coincida dentro del 0,5% o mejor.

Una vez que el valor de la potencia máxima de las cuatro curvas características medidas bajo ensayo coincide dentro del rango de 0,5% se ha obtenido el valor correcto de  $R_s$ .

Para que el valor de  $R_s$  sea lo más fiable posible, se va a repetir el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s$  que se utilizará para la verificación será el resultado de la media de estos tres valores.

#### **5.1.2. Determinación del factor de corrección k.**

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico se parte de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante y distintas temperaturas.

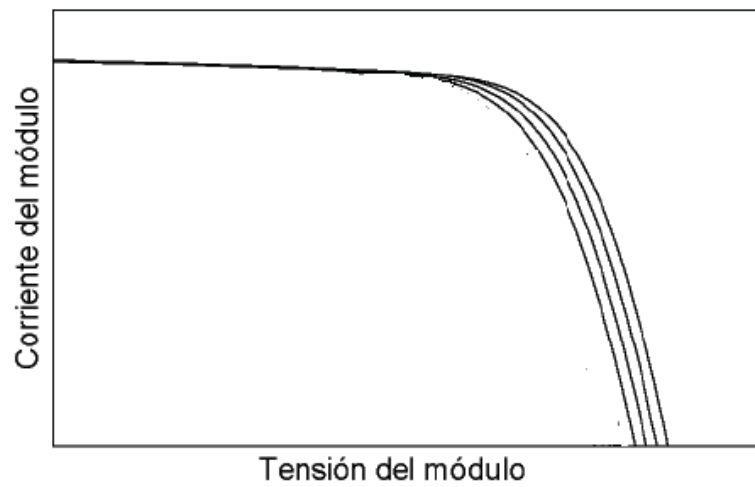


Figura 25. Curvas características a irradiancia constante.

A continuación, haciendo uso de las ecuaciones (1) y (2) y con  $k=0 \text{ } \Omega/\text{K}$  se trasladan las curvas de mayor temperatura a la de menor.

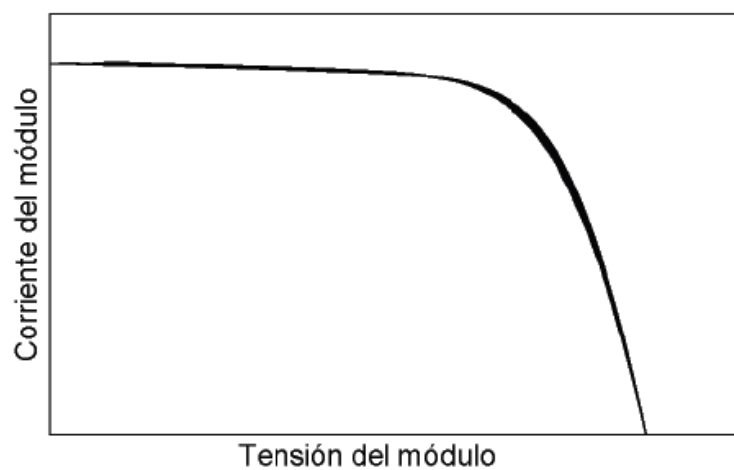


Figura 26 . Curvas características trasladadas a la de menor temperatura

Para hallar el valor correcto de  $k$  hay que incrementar su valor en pasos de  $1 \text{ m}\Omega/\text{K}$  hasta que la desviación de su potencia máxima coincida dentro del 0,5% o mejor.

Cuando que el valor de la potencia máxima de las cuatro curvas características medidas bajo ensayo coincide dentro del rango de 0,5% se ha obtenido el valor correcto de  $k$ .

Para que el valor de  $k$  sea lo más fiable posible, se va a repetir el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k$  que se utilizará para la verificación será el resultado de la media de estos tres valores.

### Verificación

Una vez que disponemos de todos los parámetros de corrección, se sustituyen en las ecuaciones (1) y (2) obteniendo la curva corregida de coordenadas  $V_2$  e  $I_2$  en las condiciones de temperatura e irradiancia deseadas.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a una curva característica, en unas determinadas condiciones de temperatura e irradiancia, las ecuaciones de corrección citadas anteriormente, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de otra curva característica medida.

Para comprobar que la curva característica obtenida es la correcta, la curva corregida y la curva medida deberían coincidir.

## 5.2. PROCEDIMIENTO 2.

En este procedimiento las ecuaciones de traslación contienen cinco parámetros de corrección I-V que pueden determinarse mediante la medida de curvas I-V en diferentes condiciones de temperatura e irradiancia.

El procedimiento de corrección se define mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_2 = I_1 \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \cdot \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \quad (3)$$

$$V_2 = V_1 - V_{OC1} \cdot \left[ \beta \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \right] - R_s' \cdot (I_2 - I_1) - k' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Donde:

$I_1, V_1$  son coordenadas de los puntos de la curva característica medida;

$I_2, V_2$  son coordenadas de los puntos de la curva característica corregida;

$G_1$  es la irradiancia medida con el dispositivo de referencia;

- $G_2$  es la irradiancia deseada;
- $T_1$  es la temperatura medida en el dispositivo bajo ensayo;
- $T_2$  es la temperatura deseada;
- $V_{oc}$  es el voltaje de circuito abierto medida del dispositivo bajo ensayo para  $T_1$  y  $G_1$ ;
- $a$  es el factor de corrección de irradiancia para el voltaje de circuito abierto;
- $\alpha, \beta$  son los coeficientes de temperatura de corriente y tensión;
- $R_s'$  es la resistencia interna serie del dispositivo;
- $k'$  es el factor de corrección de la curva.

Como se ha mencionado anteriormente, para aplicar este procedimiento de corrección es necesario conocer los parámetros de corrección de la curva que son:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R_s$  y  $k$ .

Los valores de los coeficientes de temperatura que se van a usar son estándar y son los siguientes:

$$\alpha = 1,5 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$$

$$\beta = -2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

Por lo que para poder aplicar las ecuaciones (1) y (2) y obtener la curva corregida deseada, va a ser necesario calcular los parámetros  $R_s'$ ,  $k'$  y  $a$ .



### 5.2.1. Determinación de la resistencia interna serie $R_s'$ .

Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico se parte de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante y distintas irradiancias.

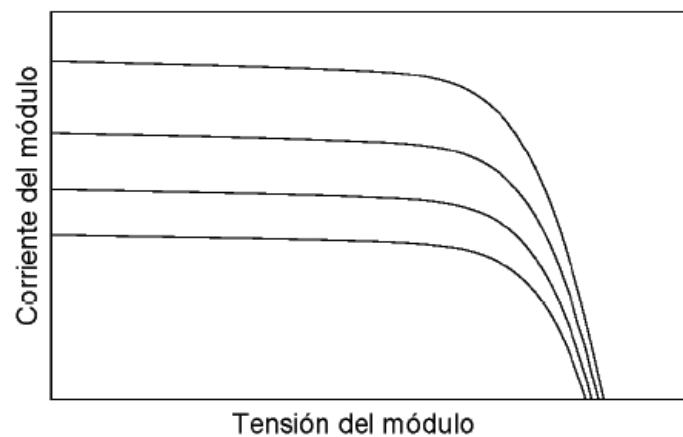


Figura 27. Curvas características a temperatura constante.

A continuación, haciendo uso de las ecuaciones (3) y (4), con  $R_s' = 0 \, \Omega$  y  $a = 0$  se trasladan las curvas de menor irradiancia a la de mayor.

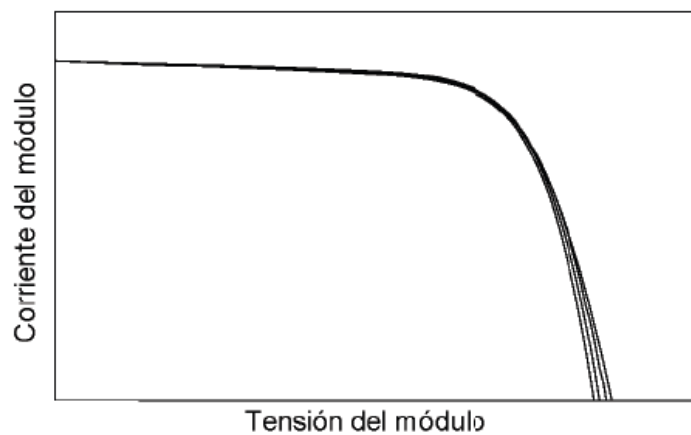


Figura 28. Curvas características trasladadas a la de mayor irradiancia.

Posteriormente, en la ecuación (4) se mantiene  $R_s'=0$  y se incrementa  $a$  en pasos de 0,001 hasta que el valor de los voltajes de circuito abierto de las curvas trasladadas coincida dentro del 0,5% o mejor.

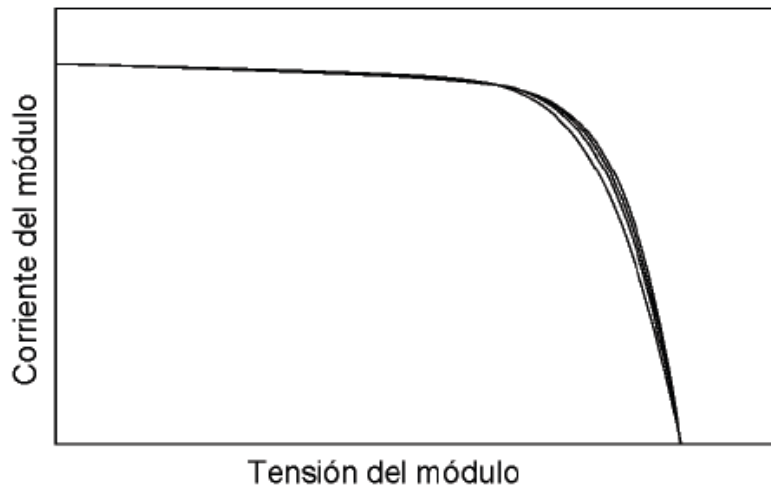


Figura 29. Curvas características corregidas con  $R_s'=0$  y  $a$  óptimo.

Para hallar el valor correcto de  $R_s'$  hay que incrementar su valor en pasos de 10 m $\Omega$  hasta que la desviación de su potencia máxima coincida dentro del 0,5% o mejor.

Una vez que el valor de la potencia máxima de las cuatro curvas características medidas bajo ensayo coincide dentro del rango de 0,5% se ha obtenido el valor correcto de  $R_s'$ .

Para que el valor de  $R_s'$  sea lo más fiable posible, se va a repetir el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s'$  que se utilizará para la verificación será el resultado de la media de estos tres valores.

### 5.2.2. Determinación del factor de corrección $k'$ .

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico se parte de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante y distintas temperaturas.

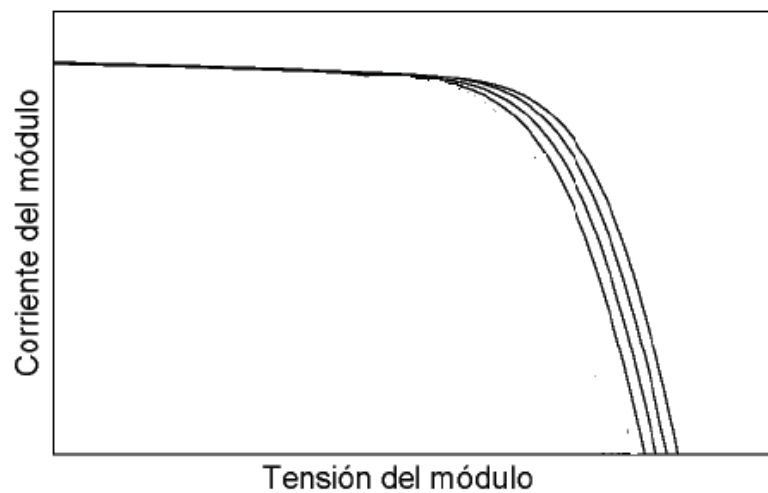


Figura 30. Curvas características a irradiancia constante.

A continuación, haciendo uso de las ecuaciones (3) y (4) y con  $k'=0 \text{ } \Omega/\text{K}$  se trasladan las curvas de mayor temperatura a la de menor.

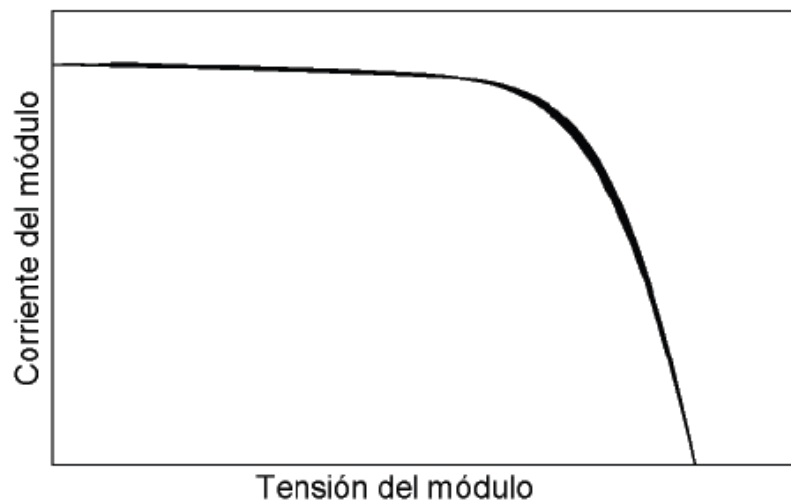


Figura 31. Curvas características trasladadas a la de menor temperatura.

Para hallar el valor correcto de  $k'$  hay que incrementar su valor en pasos de  $1 \text{ m}\Omega/\text{K}$  hasta que la desviación de su potencia máxima coincida dentro del 0,5% o mejor.

Cuando que el valor de la potencia máxima de las cuatro curvas características medidas bajo ensayo coincide dentro del rango de 0,5% se ha obtenido el valor correcto de  $k'$ .

Para que el valor de  $k'$  sea lo más fiable posible, se va a repetir el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k'$  que se utilizará para la verificación será el resultado de la media de estos tres valores.

### Verificación

Una vez que disponemos de todos los parámetros de corrección, se sustituyen en las ecuaciones (1) y (2) obteniendo la curva corregida de coordenadas  $V_2$  e  $I_2$  en las condiciones de temperatura e irradiancia deseadas.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a una curva característica, en unas determinadas condiciones de temperatura e irradiancia, las ecuaciones de corrección citadas anteriormente, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de otra curva característica medida.

Para comprobar que la curva característica obtenida es la correcta, la curva corregida y la curva medida deberían coincidir.

### **5.3. PROCEDIMIENTO 3.**

Este proceso se basa en la interpolación o extrapolación lineal de dos características I-V medidas. Se necesitan dos curvas características I-V medidas y no requiere parámetros de corrección o parámetros de ajuste. Las curvas características I-V deben corregirse aplicando las siguientes ecuaciones:

$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1) \quad (5)$$

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1) \quad (6)$$

Donde:

$I_1, V_1$  son coordenadas de puntos en la curva característica medida a una irradiancia  $G_1$  y temperatura  $T_1$ ;

$I_2, V_2$  son coordenadas de puntos en la curva característica medida a una irradiancia  $G_2$  y temperatura  $T_2$ ;

$I_3, V_3$  son coordenadas de puntos en la curva característica medida a una irradiancia  $G_3$  y temperatura  $T_3$ ;

$I_{sc1}, I_{sc2}$  son las corrientes de cortocircuito medidas del dispositivo bajo ensayo

$a$  es una constante para la interpolación, que tiene la relación con la temperatura y la irradiancia que sigue:

$$G_3 = G_1 + a \cdot (G_2 - G_1) \quad (7)$$

$$T_3 = T_1 + a \cdot (T_2 - T_1) \quad (8)$$

### 5.3.1. Corrección para temperatura e irradiancia para dos curvas I-V medidas.

El procedimiento para corregir la curva característica I-V a la irradiancia y temperatura ( $G_3, T_3$ ) a partir de dos curvas características I-V medidas a las irradiancias y temperaturas ( $G_1, T_1$ ) y ( $G_2, T_2$ ) empieza por medir las dos curvas características y calcular el valor de  $a$  con las ecuaciones (7) u (8).

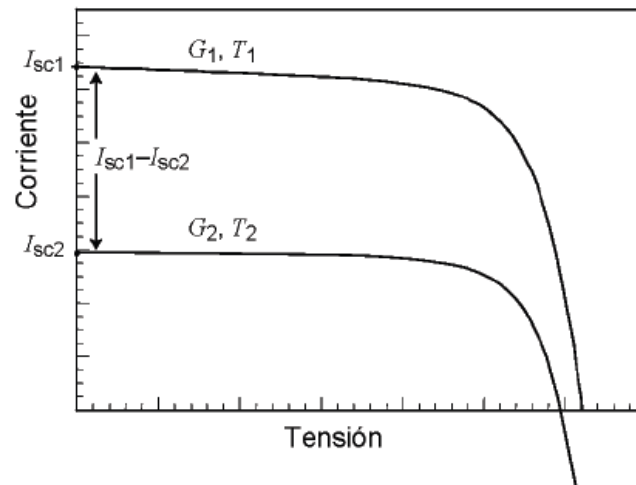


Figura 32. Curvas características I-V medidas a las irradiancias y temperaturas  $(G_1, T_1)$  y  $(G_2, T_2)$ .

Una vez hallado el valor de  $a$  se procede a calcular  $V_3$  e  $I_3$  con las ecuaciones (5) y (6).

Dentro de este procedimiento se va a realizar la corrección en irradiancia y la corrección por temperatura.

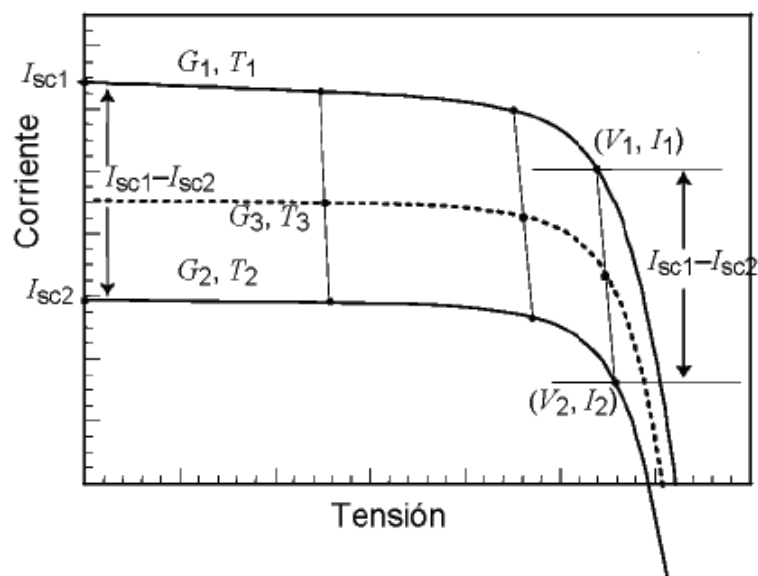


Figura 33. Corrección en irradiancia.

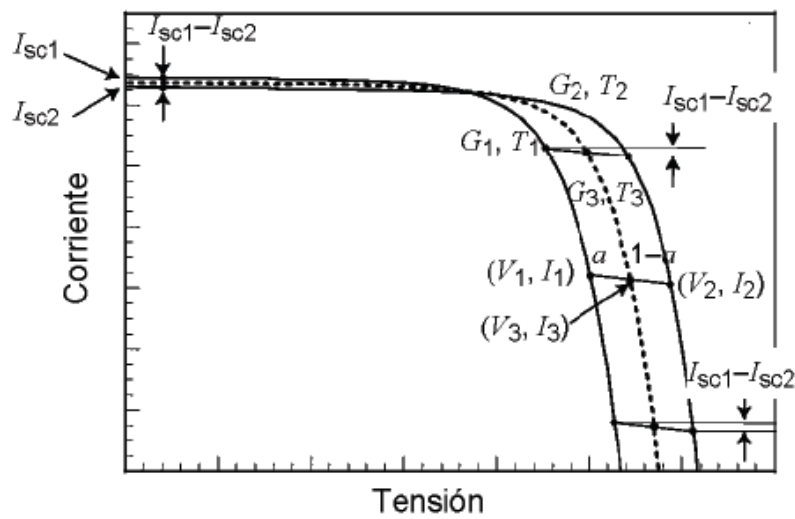


Figura 34. Corrección por temperatura.

Debería observarse que una vez fijados los valores de  $G_1$ ,  $T_1$ ,  $G_2$ ,  $T_2$ , no pueden escogerse  $G_3$ ,  $T_3$  de forma independiente porque están ligados por las relaciones dadas en las ecuaciones (7) y (8).

Esto es, cuando se fija el valor de  $G_3$  en la ecuación (7) para hallar  $a$ , el valor de  $T_3$  sería el que indica la ecuación (8) utilizando el valor de  $a$ .

### 5.3.2. Corrección para temperatura e irradiancia para tres curvas I-V medidas.

La corrección de curvas características I-V a distintos rangos de irradiancia y temperatura es posible combinando los procedimientos descritos en el apartado anterior.



Cuando se dispone de tres curvas características medidas a irradiancias y temperaturas de  $(G_a, T_a)$ ,  $(G_b, T_b)$  y  $(G_c, T_c)$  puede calcularse la curva característica I-V a cualesquiera irradiancia y temperatura  $(G_n, T_n)$ .

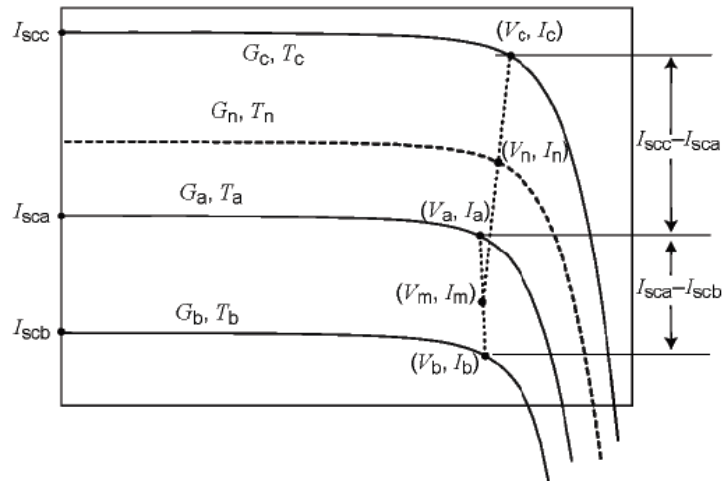


Figura 35. Curva característica corregida.

A partir de  $(G_a, T_a)$  y  $(G_b, T_b)$  calculamos la curva característica  $(G_m, T_m)$ , y con esta ultima y  $(G_c, T_c)$  calculamos la curva característica  $(G_n, T_n)$ .

Dentro de este procedimiento se va a realizar la corrección en irradiancia y la corrección por temperatura.

### 5.3.3. Corrección para temperatura e irradiancia para cuatro curvas I-V medidas.

Cuando se dispone de cuatro curvas características medidas a irradiancias y temperaturas de  $(G_a, T_a)$ ,  $(G_b, T_b)$ ,  $(G_c, T_c)$  y  $(G_d, T_d)$  puede calcularse la curva característica I-V a cualesquiera irradiancia y temperatura  $(G_n, T_n)$  con un procedimiento similar al mencionado en el apartado anterior.

A partir de  $(G_a, T_a)$  y  $(G_b, T_b)$  calculamos la curva característica  $(G_1, T_1)$ , y a partir de  $(G_c, T_c)$  y  $(G_d, T_d)$  calculamos la curva característica  $(G_m, T_m)$ .

Una vez obtenidas las curvas características  $(G_1, T_1)$  y  $(G_m, T_m)$  hay que repetir el proceso una vez más para obtener la curva  $(G_n, T_n)$ .

Dentro de este procedimiento se va a realizar la corrección en irradiancia y la corrección por temperatura.

# **CAPÍTULO 6**

## **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos de aplicar los tres métodos de traslación de curvas explicados en el capítulo 5 para cuatro módulos fotovoltaicos que denominaremos Módulo A, B, C y D.

Estos módulos están compuestos por celdas de distintas tecnologías.

	TECNOLOGÍAS DE LAS CÉLULAS
Módulo A	CdTe (Telururo de cadmio) Policristalina
Módulo B	a-Si (Silicio amorfo)
Módulo C	CIS (diseleniuro de indio de cobre)
Módulo D	a-Si (Silicio amorfo)

**Tabla 1. Tipos de células.**

### 6.1. PROCEDIMIENTO 1

En este primer procedimiento, para realizar la verificación de dos curvas características medidas en dispositivo bajo ensayo hay que aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5. Para ello, es necesario conocer el valor de los coeficientes de temperatura,  $\alpha$  y  $\beta$ , y de los parámetros de corrección,  $R_s$  y  $k$ .

Los valores de los coeficientes de temperatura que se van a usar son estándar y son los siguientes:

$$\alpha = 1,5 \text{ mA/}^{\circ}\text{C}$$

$$\beta = -2,3 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$$

Por lo que se ha procedido a calcular el valor de los parámetros que se desconocen para posteriormente realizar la verificación de las curvas características.

### 6.1.1. Módulo A

#### Cálculo de $R_s$ :

Para determinar el valor de la resistencia interna serie del módulo fotovoltaico ( $R_s$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25° y a distintas irradiancias.

$$\text{Curva 1: } G_1 = 606.83159 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Curva 2: } G_2 = 557.93524 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Curva 3: } G_3 = 515.47585 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Curva 4: } G_4 = 324.21329 \text{ W/m}^2$$

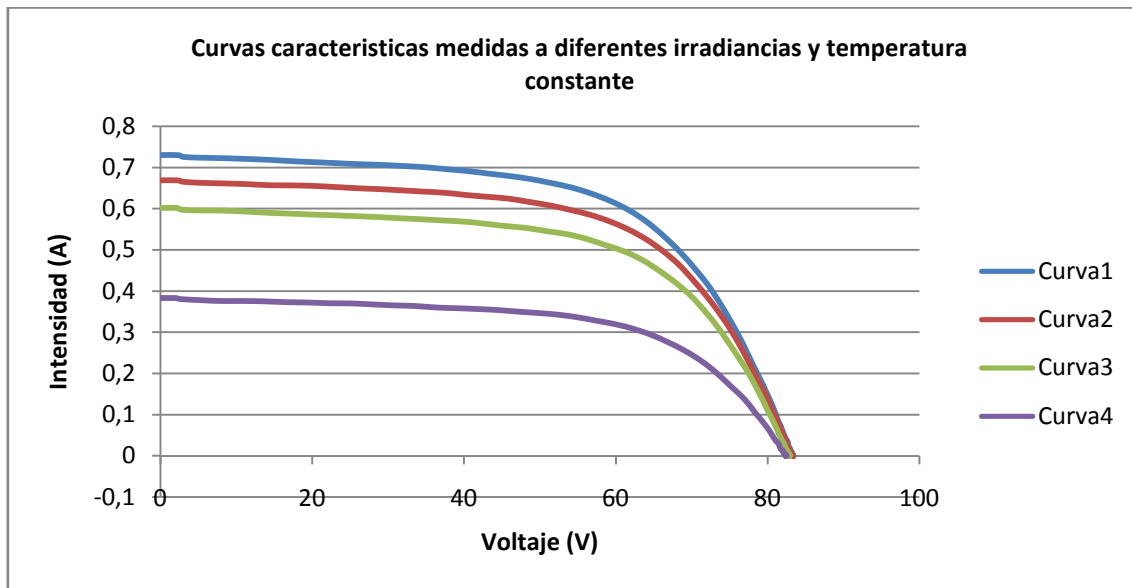


Figura 36. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.68	0.51	0.79

Tabla 2. Valores  $R_s$ .

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s=0.66 \Omega$

### Cálculo de k:

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1 = 39.97^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2 = 45.462^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3 = 52.757^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4 = 54.323^\circ\text{C}$

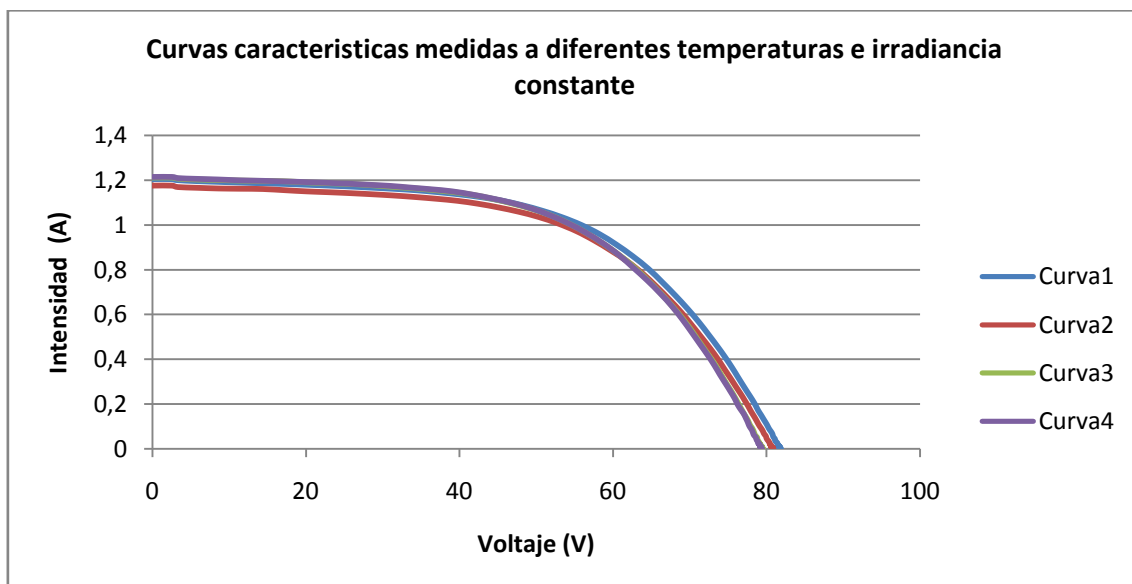


Figura 37. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.

El valor de k es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo

para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (G=1000 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 2 (G=800 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 3 (G=600 W/m <sup>2</sup> )
k (Ω/K)	0.38	0.24	0.23

**Tabla 3. Valores k.**

Así pues, el valor del factor de corrección para este módulo es:  $k=0.2833333 \text{ } \Omega/\text{K}$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1= 50.142 \text{ } ^\circ\text{C}$

$G_1= 922.65951 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $T_2= 41.668 \text{ } ^\circ\text{C}$

$G_2= 815.1589 \text{ W/m}^2$



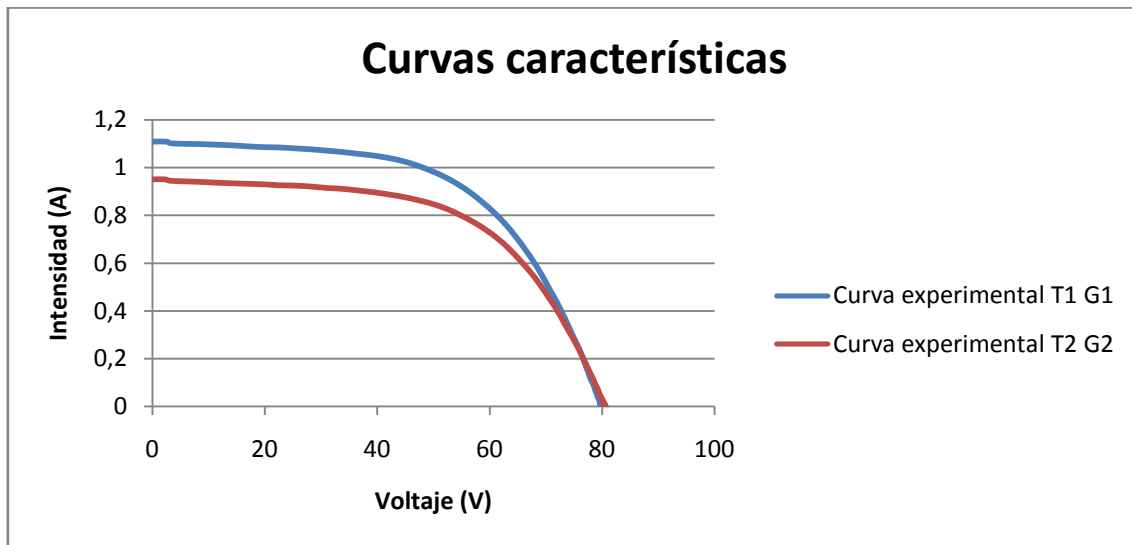


Figura 38. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

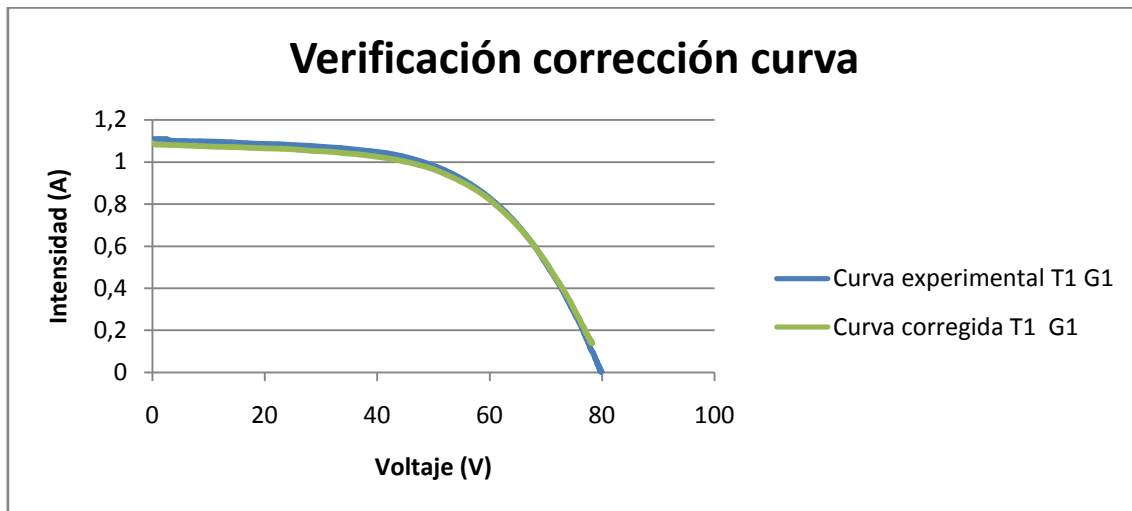


Figura 39. Verificación de la corrección de la curva.

### 6.1.2. Módulo B

#### Cálculo de $R_s$ :

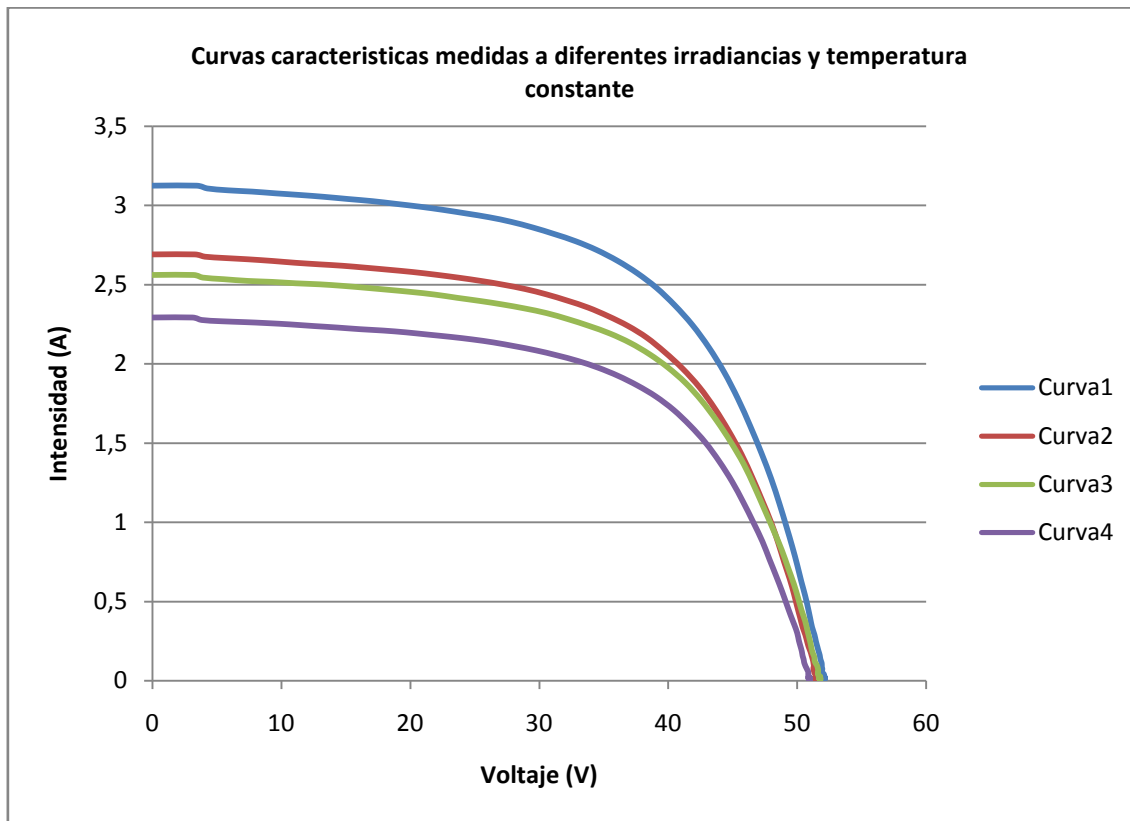
Para determinar el valor de la resistencia interna serie del módulo fotovoltaico ( $R_s$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25° y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 704.59295 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 450.81695 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 314.36366 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 247.00085 \text{ W/m}^2$



**Figura 40. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.**

El valor de  $R_s$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s(\Omega)$	0.32	0.57	0.41

**Tabla 4. Valores  $R_s$ .**

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s=0.43333 \Omega$

### Cálculo de k:

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1 = 43.48 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2 = 48.247 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3 = 51.185 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4 = 57.780 \text{ }^\circ\text{C}$

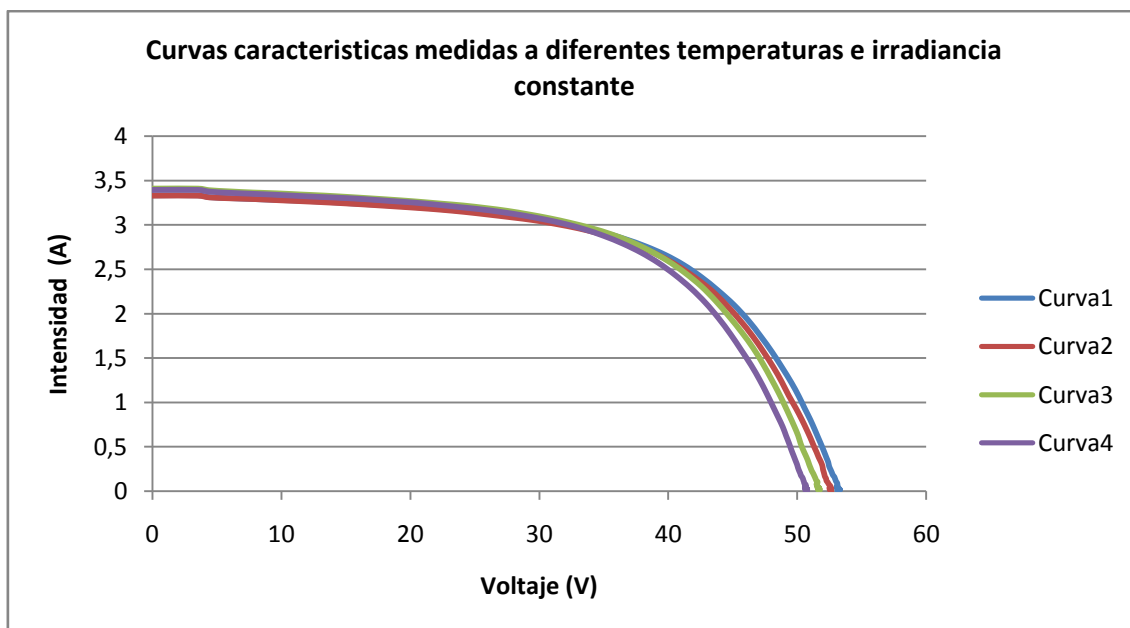


Figura 41. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.

El valor de k es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo

para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 ( $G=1000$ $W/m^2$ )	Grupo 2 ( $G=800$ $W/m^2$ )	Grupo 3 ( $G=600$ $W/m^2$ )
$k$ ( $\Omega/K$ )	0.54	0.72	0.57

Tabla 5. Valores  $k$ .

Así pues, valor del factor de corrección para este módulo es:  $k=0.61 \Omega/K$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

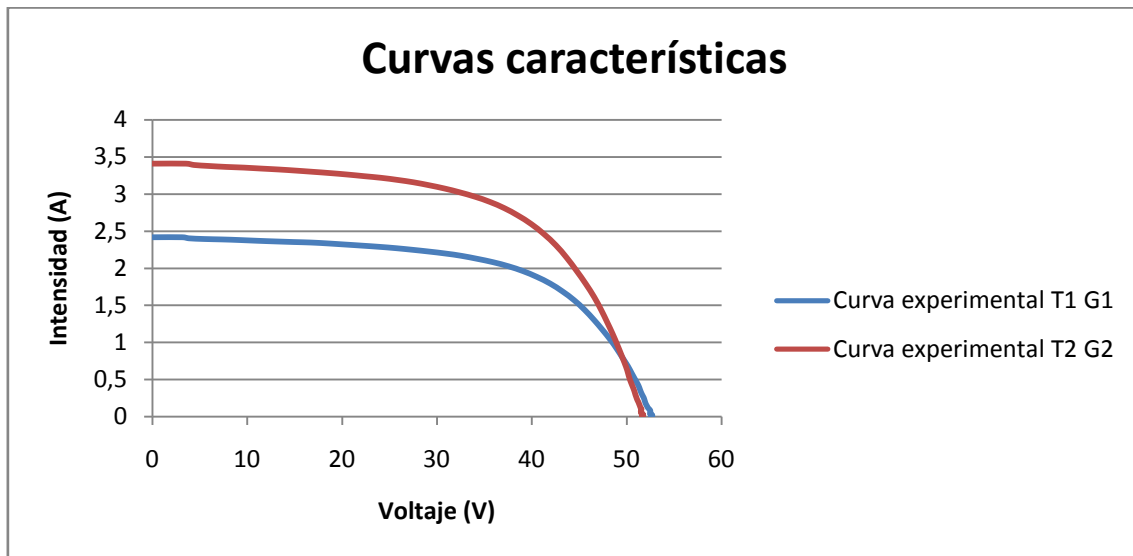
Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1= 44.231 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_1= 705.4289W/m^2$$

Curva 2:  $T_2= 51.185 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_2= 1000.43354W/m^2$$



**Figura 42. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.**

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

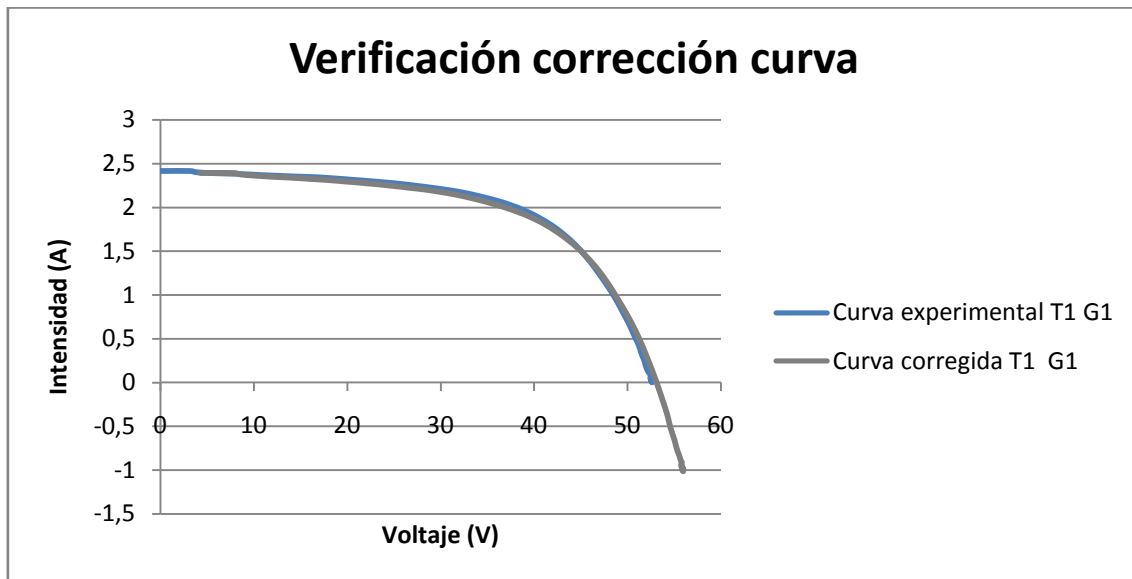


Figura 43. Verificación de la corrección de la curva.

### 6.1.3. Módulo C

#### Cálculo de $R_s$ :

Para determinar el valor de la resistencia interna serie del módulo fotovoltaico ( $R_s$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25º y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 740.19925 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 678.4410 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 584.982 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 538.789 \text{ W/m}^2$

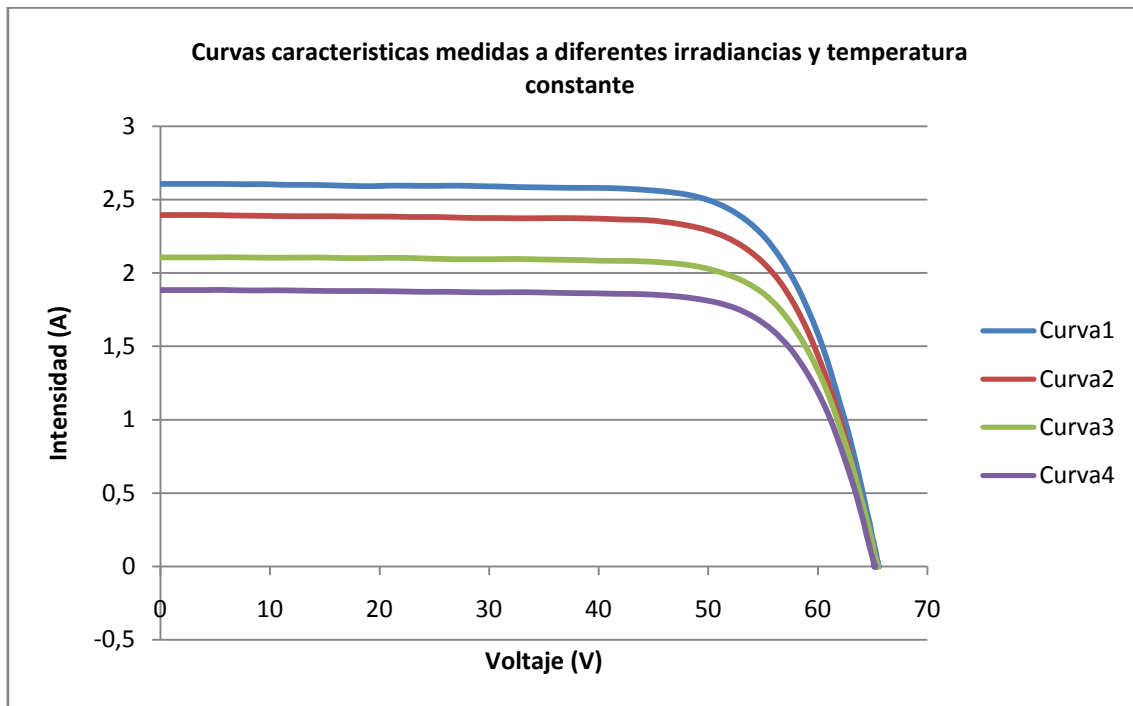


Figura 44. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.97	0.63	0.76

Tabla 6. Valores  $R_s$ .

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s=0.7866667$



### Cálculo de k:

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1 = 44.517 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2 = 47.257 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3 = 50.776 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4 = 54.178^\circ\text{C}$

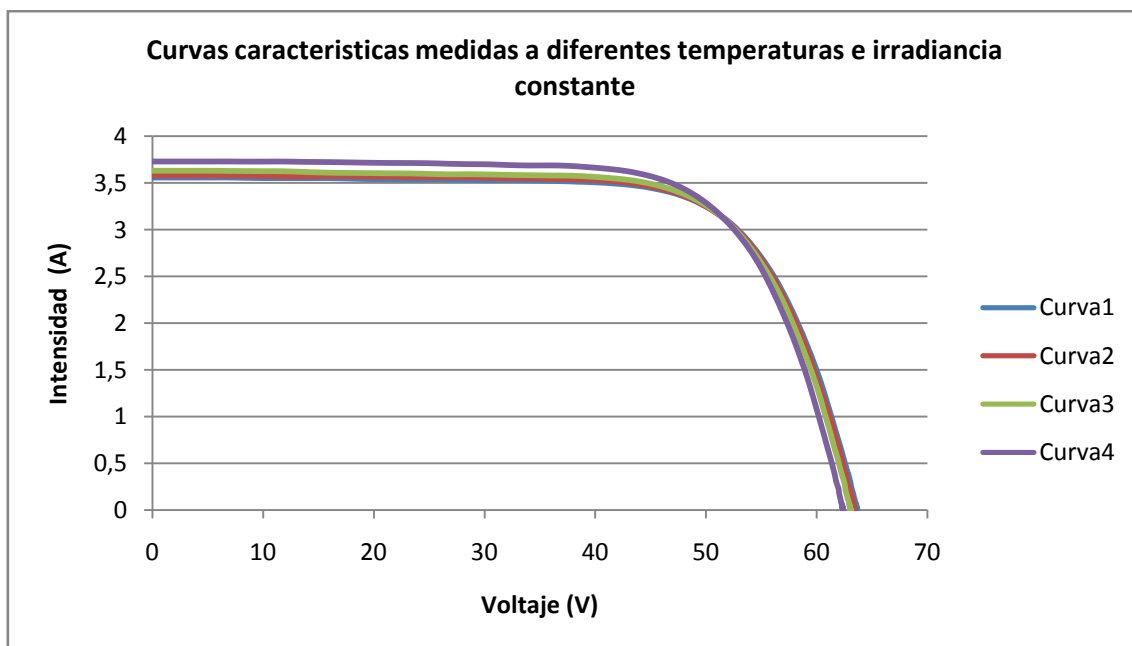


Figura 45. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.

El valor de k es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo

para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 ( $G=1000$ $W/m^2$ )	Grupo 2 ( $G=800$ $W/m^2$ )	Grupo 3 ( $G=600$ $W/m^2$ )
$k(\Omega/K)$	0.22	0.21	0.16

**Tabla 7. Valores  $k$ .**

Así pues, valor del factor de corrección para este módulo es:  $k=0.1966 \Omega/K$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1 = 41.668 \text{ }^\circ\text{C}$

$G_1 = 908.8566 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $T_2 = 50.112 \text{ }^\circ\text{C}$

$G_2 = 1035.66493 \text{ W/m}^2$

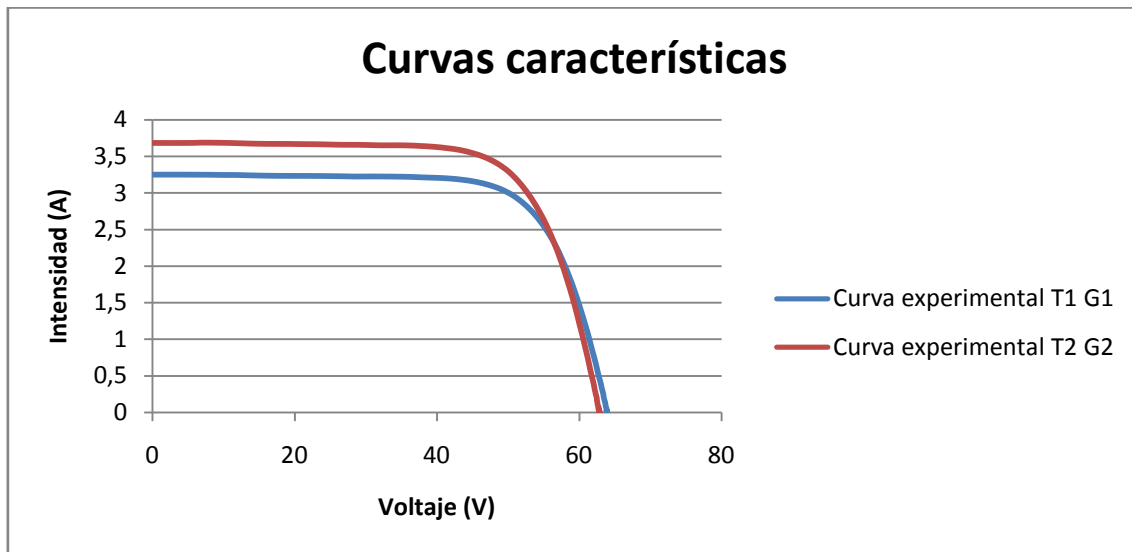


Figura 46. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

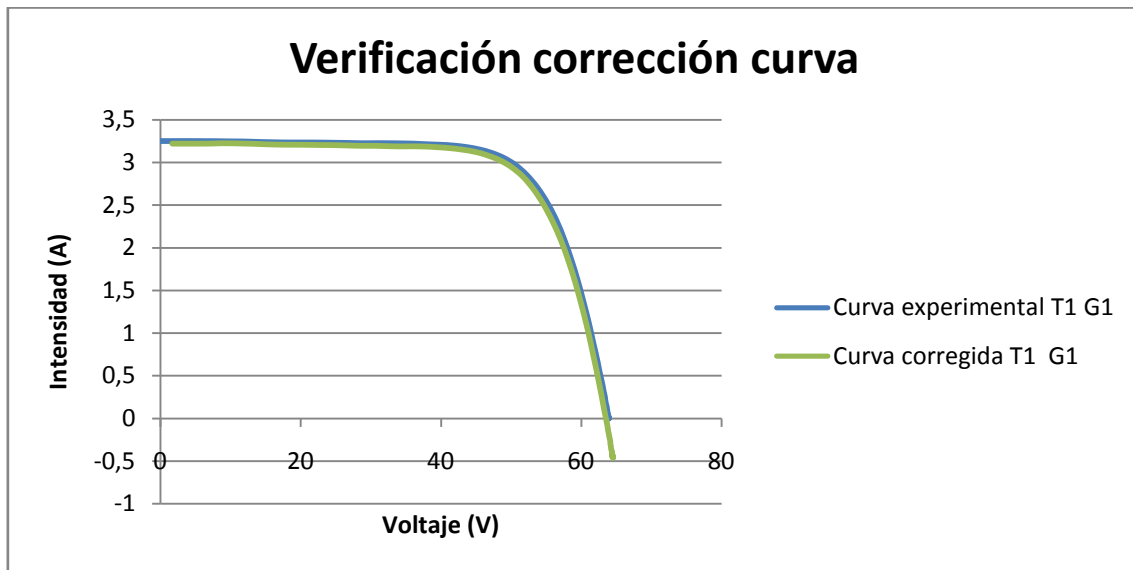


Figura 47. Verificación de la corrección de la curva.

#### 6.1.4. Módulo D

##### Cálculo de $R_s$ :

Para determinar el valor de la resistencia interna serie del módulo fotovoltaico ( $R_s$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25° y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 528.46829 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 461.76488 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 434.3686 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 408.47622 \text{ W/m}^2$

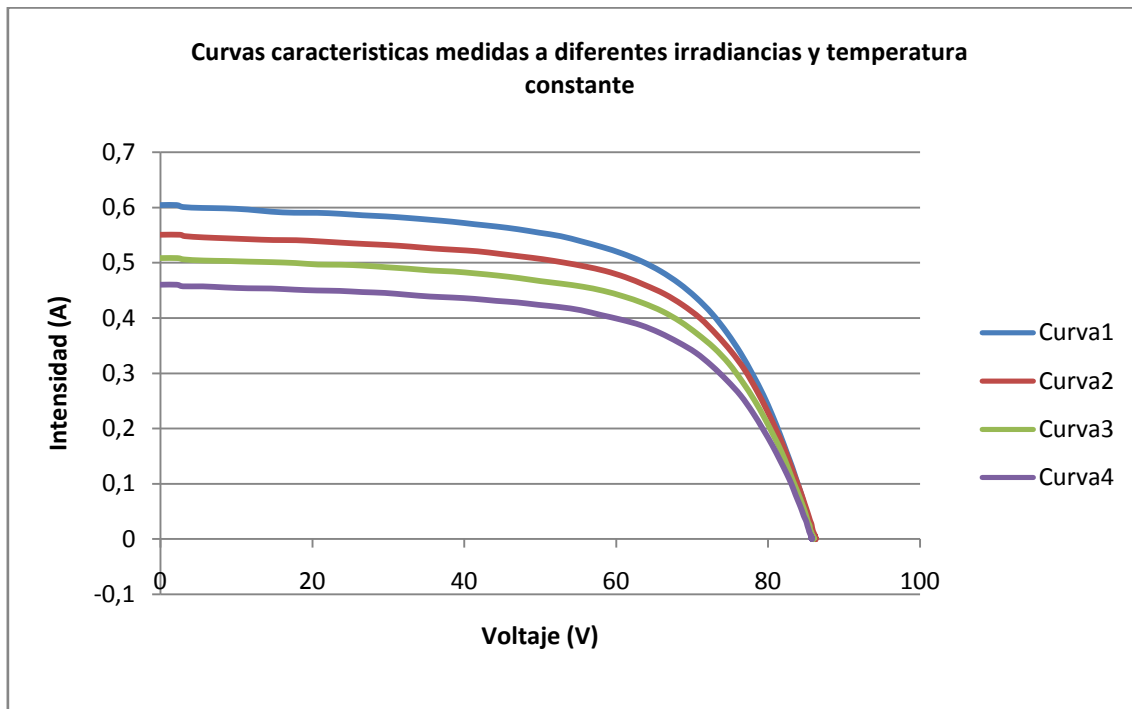


Figura 48. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s(\Omega)$	0.38	0.22	0.26

Tabla 8. Valores  $R_s$ .

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s=0.2866667 \Omega$

### Cálculo de k:

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1 = 40.351 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2 = 46.52 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3 = 51.185 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4 = 54.680 \text{ }^\circ\text{C}$

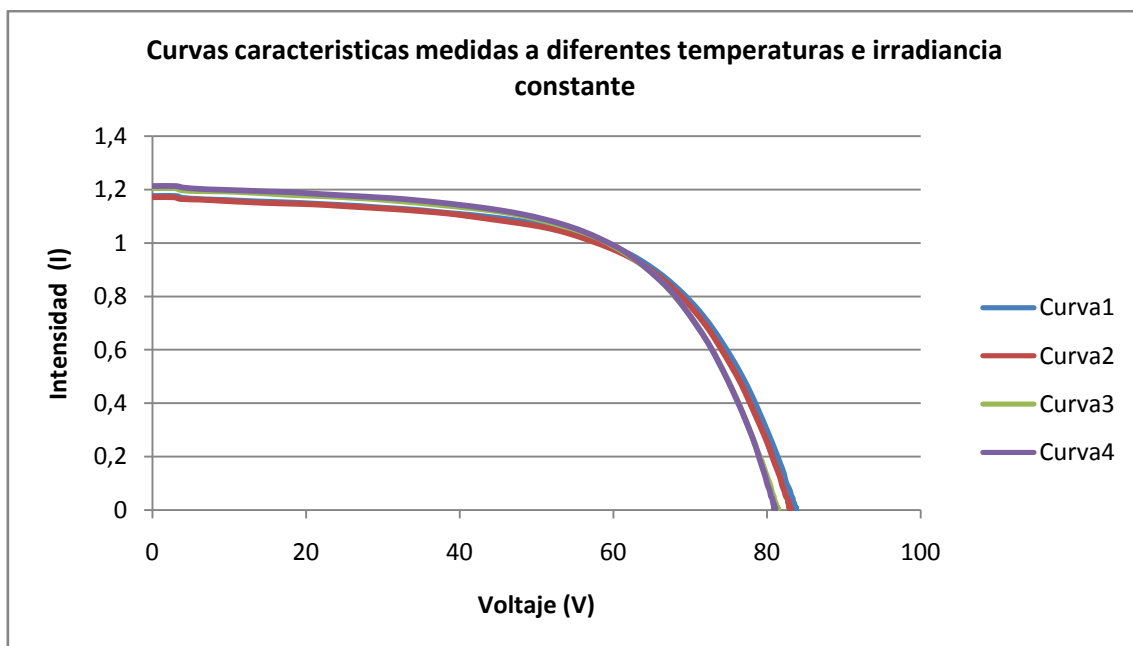


Figura 49. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.

El valor de k es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo

para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (G=1000 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 2 (G=800 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 3 (G=600 W/m <sup>2</sup> )
K(Ω/K)	0.18	0.12	0.23

**Tabla 9. Valores  $k$ .**

Así pues, valor del factor de corrección para este módulo es:  $k=0.1766666 \text{ } \Omega/\text{K}$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1 = 41.668 \text{ } ^\circ\text{C}$

$G_1 = 815.1589 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $T_2 = 50.142 \text{ } ^\circ\text{C}$

$G_2 = 922.6595 \text{ W/m}^2$

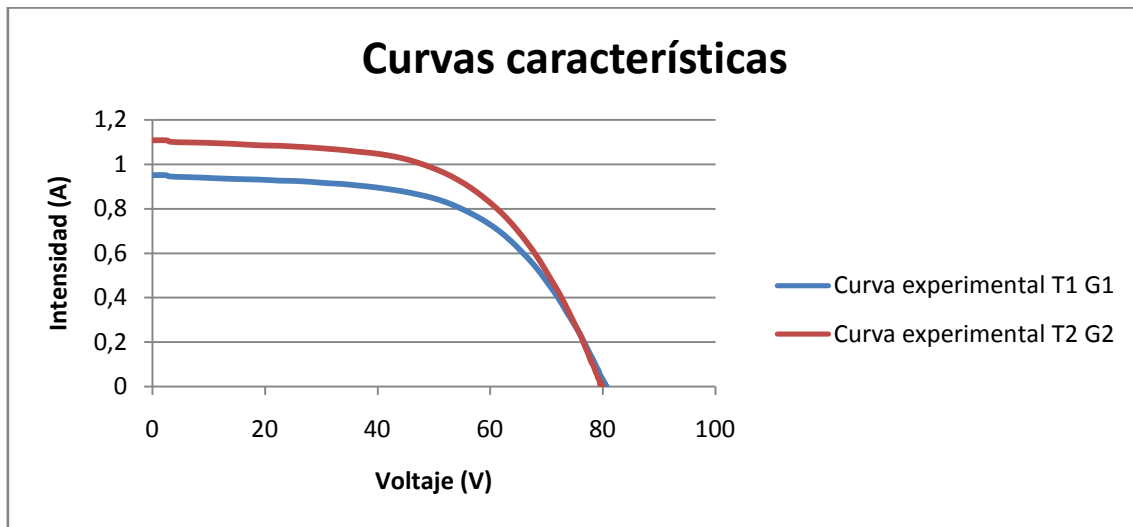


Figura 50. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.



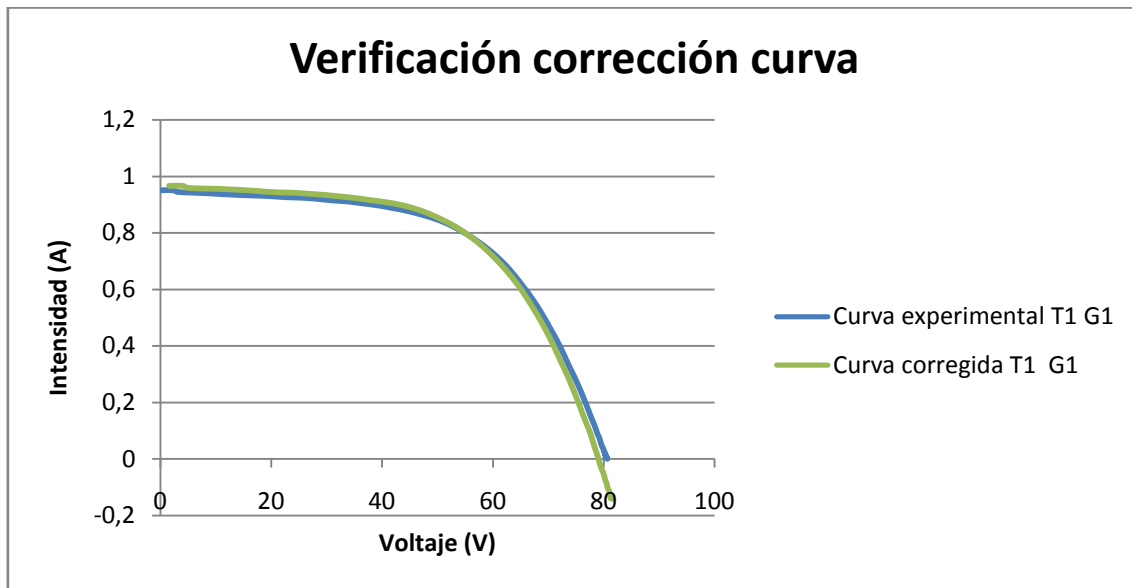


Figura 51. Verificación de la corrección de la curva.

## 6.2. PROCEDIMIENTO 2

En este segundo procedimiento, para realizar la verificación de dos curvas características medidas en dispositivo bajo ensayo hay que aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5. Para ello, es necesario conocer el valor de los coeficientes de temperatura,  $\alpha$  y  $\beta$ , de los parámetros de corrección,  $R_s'$  y  $k'$ , y en este caso el valor de  $a$  que es el factor de corrección de irradiancia para el voltaje en circuito abierto.

Los valores de los coeficientes de temperatura que se van a usar son estándar y son los siguientes:

$$\alpha = 1,5 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$$

$$\beta = -2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

### 6.2.1. Módulo A

#### Cálculo de $R_s'$ y $a$ :

El proceso de cálculo de la resistencia interna serie  $R_s'$  es el mismo que en el procedimiento 1 y el cálculo del parámetro  $a$  se realiza al mismo tiempo que el de  $R_s'$ .

Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico ( $R_s'$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25º y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 606.83159 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 557.93524 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 515.47585 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 324.21329 \text{ W/m}^2$

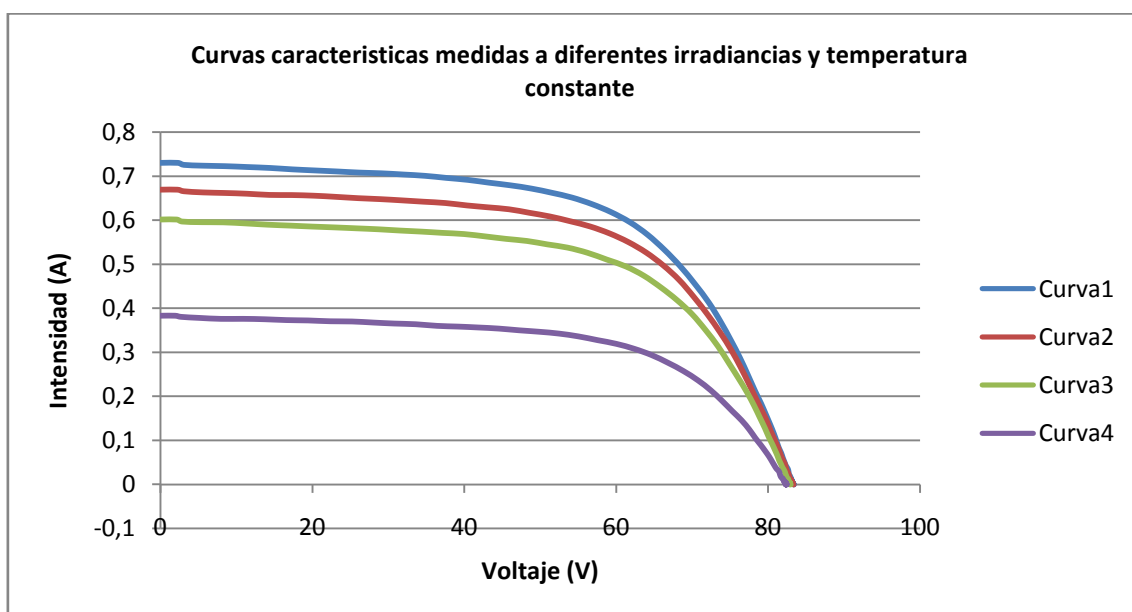


Figura 52. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s' (\Omega)$	0.13	0.27	0.21
a	0.003	0.004	0.003

**Tabla 10. Valores  $R_s'$ .**

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s'=0.203333 \Omega$  y el valor de a es:  $a=0.003$ .

#### Cálculo de $k'$ :

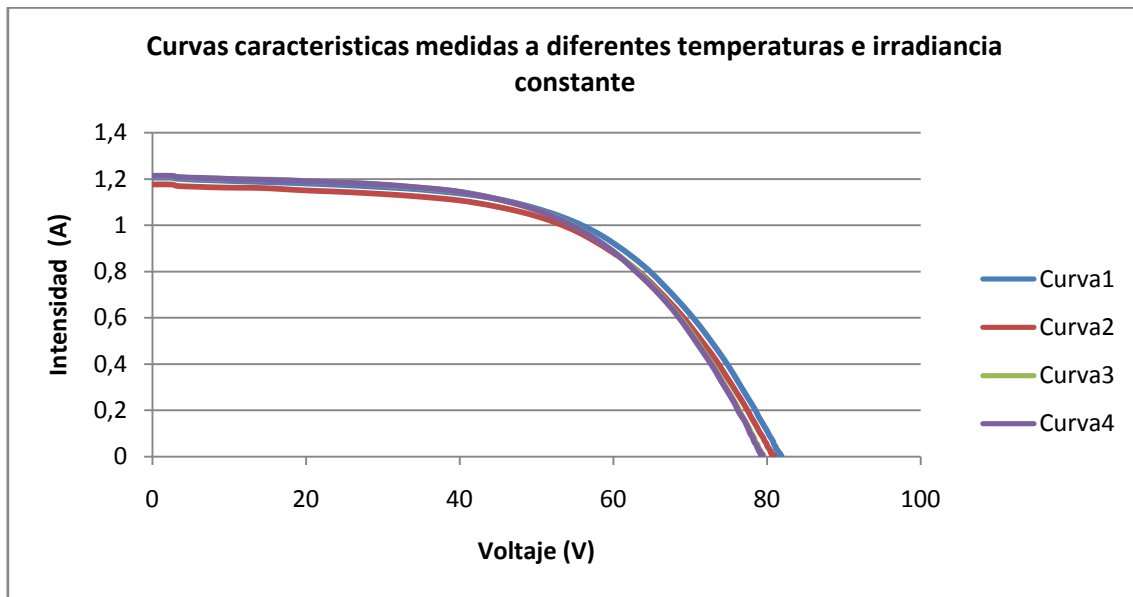
Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1= 39.97 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2= 45.462 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3= 52.757 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4= 54.323 \text{ }^\circ\text{C}$



**Figura 53. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.**

El valor de  $k'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (G=1000 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 2 (G=800 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 3 (G=600 W/m <sup>2</sup> )
$k'$ (Ω/K)	0.067	0.036	0.012

**Tabla 11. Valores  $k'$ .**

Así pues, el valor del factor de corrección para este módulo es:  $k'=0.03833333 \text{ } \Omega/\text{K}$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1 = 50.142\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 922.65951\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 41.668\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 815.1589\text{ W/m}^2$$

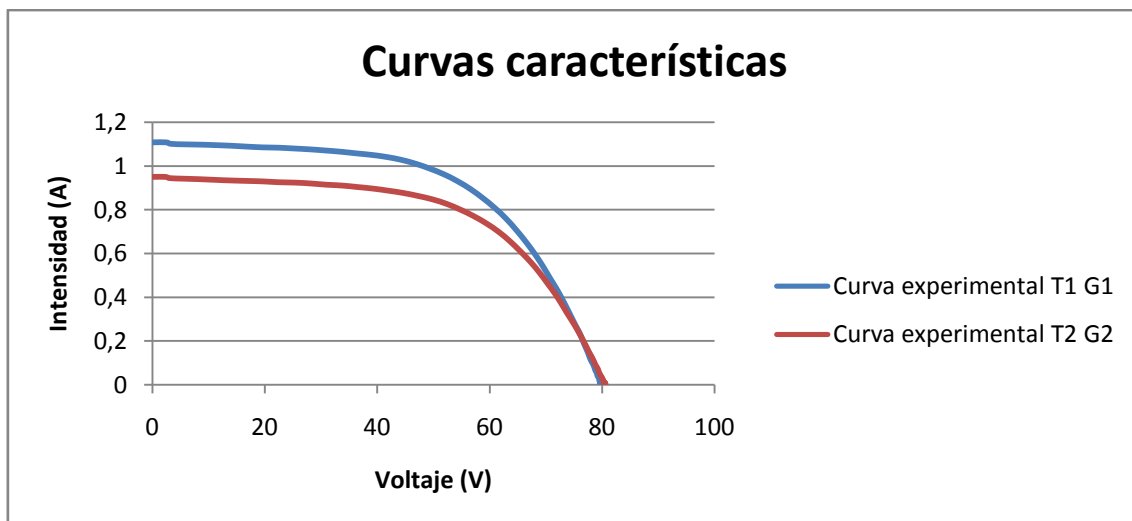


Figura 54. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para

llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1, G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

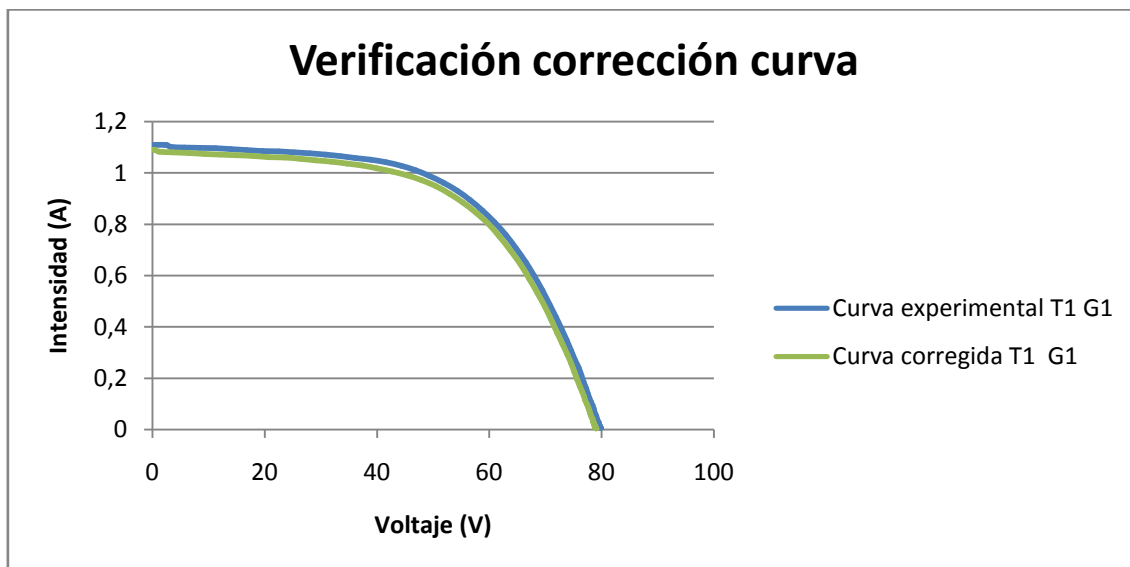


Figura 55. Verificación de la corrección de la curva.

### 6.2.2. Módulo B

#### Cálculo de $R_s'$ y $a$ :

El proceso de cálculo de la resistencia interna serie  $R_s'$  es el mismo que en el procedimiento 1 y el cálculo del parámetro  $a$  se hace al mismo tiempo que el de  $R_s'$ .

Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico ( $R_s'$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25º y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 704.59295 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 450.81695 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 314.36366 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 247.00085 \text{ W/m}^2$

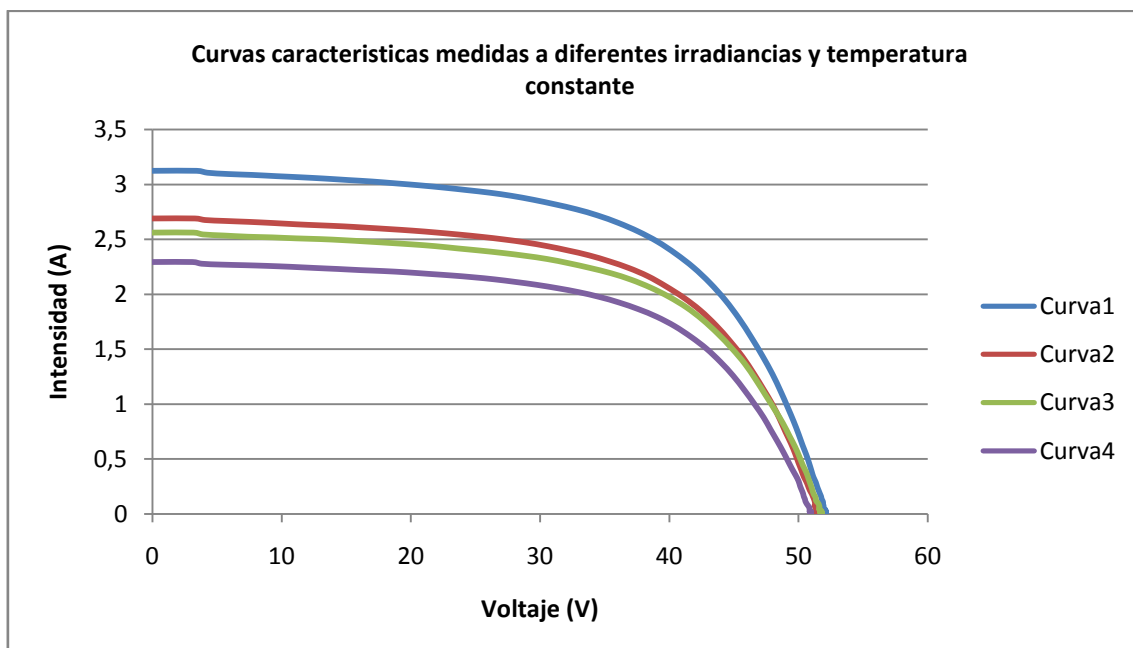


Figura 56. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s'$	0.16	0.31	0.26
a	0.003	0.004	0.002

**Tabla 12. Valores  $R_s'$ .**

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s'=0.233333$  y el valor de a es:  $a=0.003$ .

#### Cálculo de $k'$ :

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1= 43.48 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2= 48.247 \text{ }^\circ\text{C}$



Curva 3:  $T_3 = 51.185\text{ }^{\circ}\text{C}$

Curva 4:  $T_4 = 57.780\text{ }^{\circ}\text{C}$

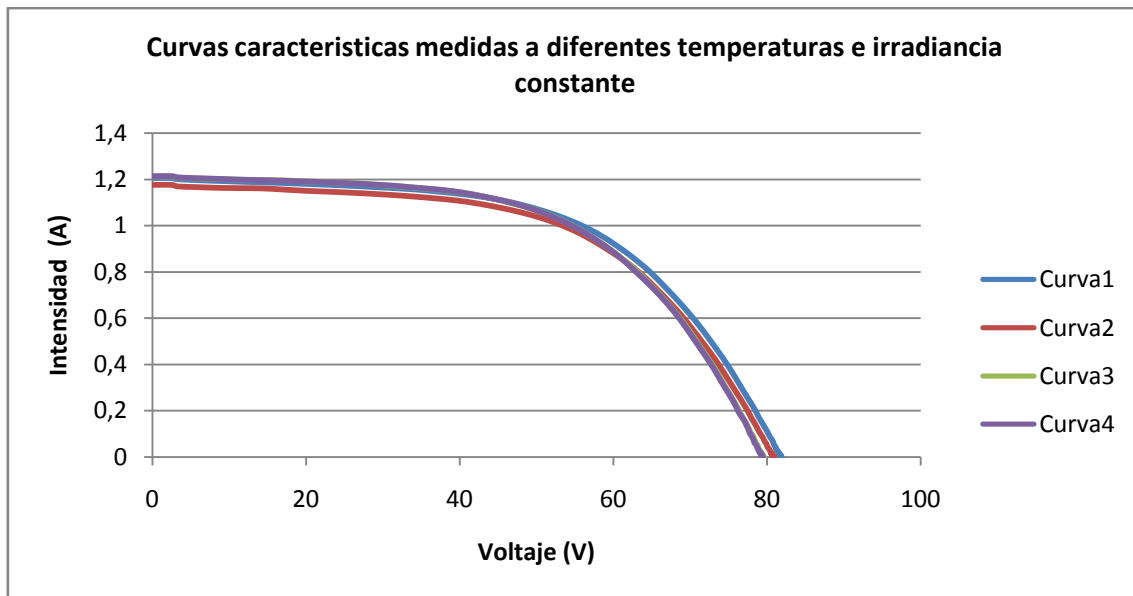


Figura 57. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.

El valor de  $k'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (G=1000 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 2 (G=800 W/m <sup>2</sup> )	Grupo 3 (G=600 W/m <sup>2</sup> )
k'(Ω/K)	0.043	0.066	0.016

**Tabla 13. Valores k'.**

Así pues, el valor del factor de corrección para este módulo es:  $k'=0.0416667 \text{ } \Omega/\text{K}$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

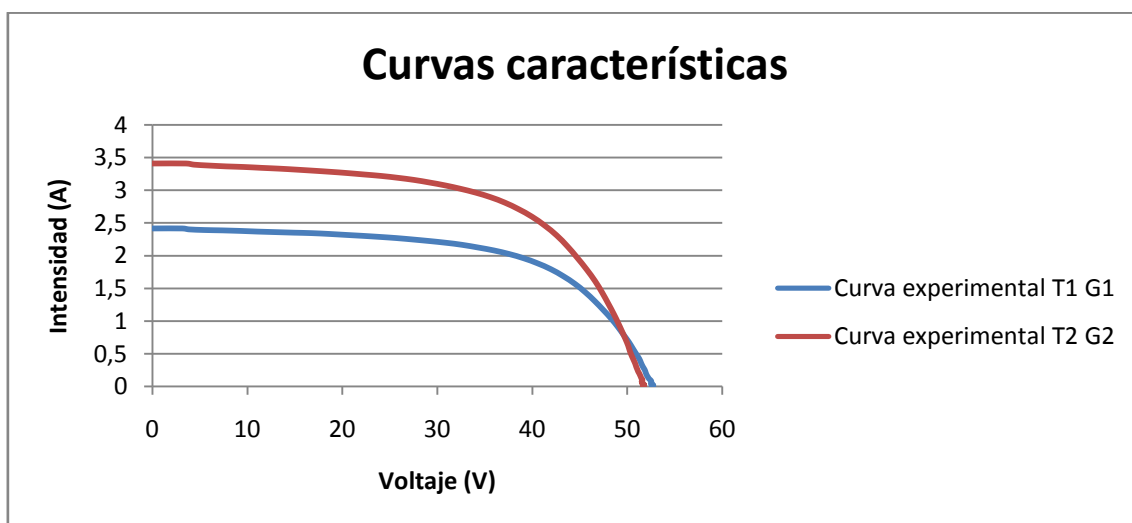
Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1= 44.231 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$G_1= 705.4289\text{W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2= 51.185 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$G_2= 1000.43354\text{W/m}^2$$



**Figura 58. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.**

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

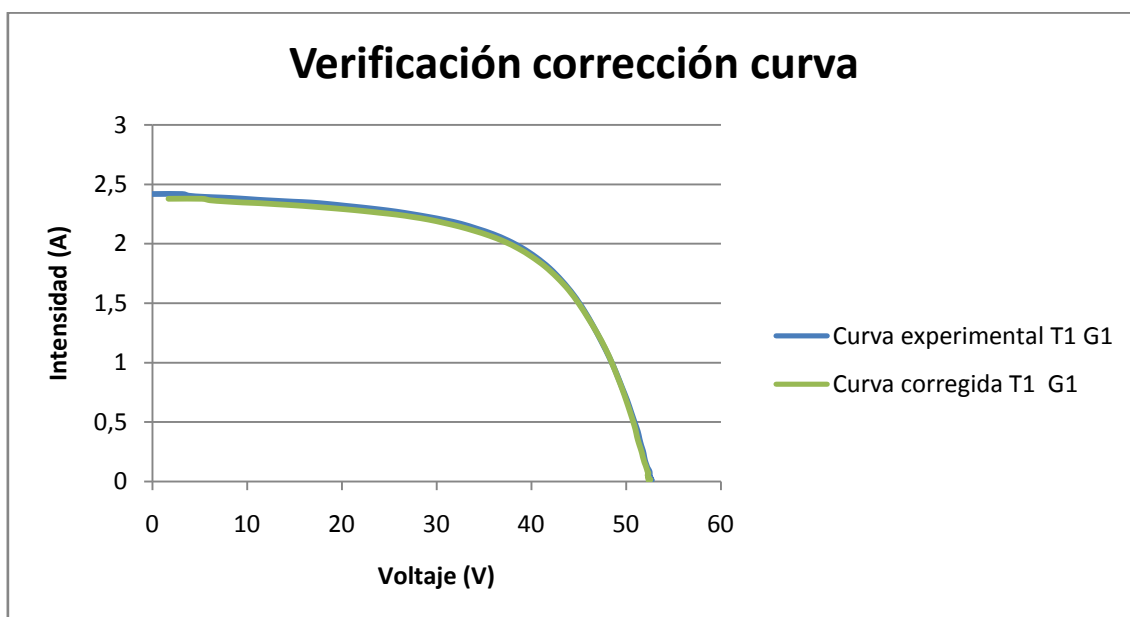


Figura 59. Verificación de la corrección de la curva.

### 6.2.3. Módulo C

#### Cálculo de $R_s'$ y $a$ :

El proceso de cálculo de la resistencia interna serie  $R_s'$  es el mismo que en el procedimiento 1 y el cálculo del parámetro  $a$  se hace al mismo tiempo que el de  $R_s'$ .

Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico ( $R_s'$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25º y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 740.19925 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 678.4410 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 584.982 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 538.789 \text{ W/m}^2$

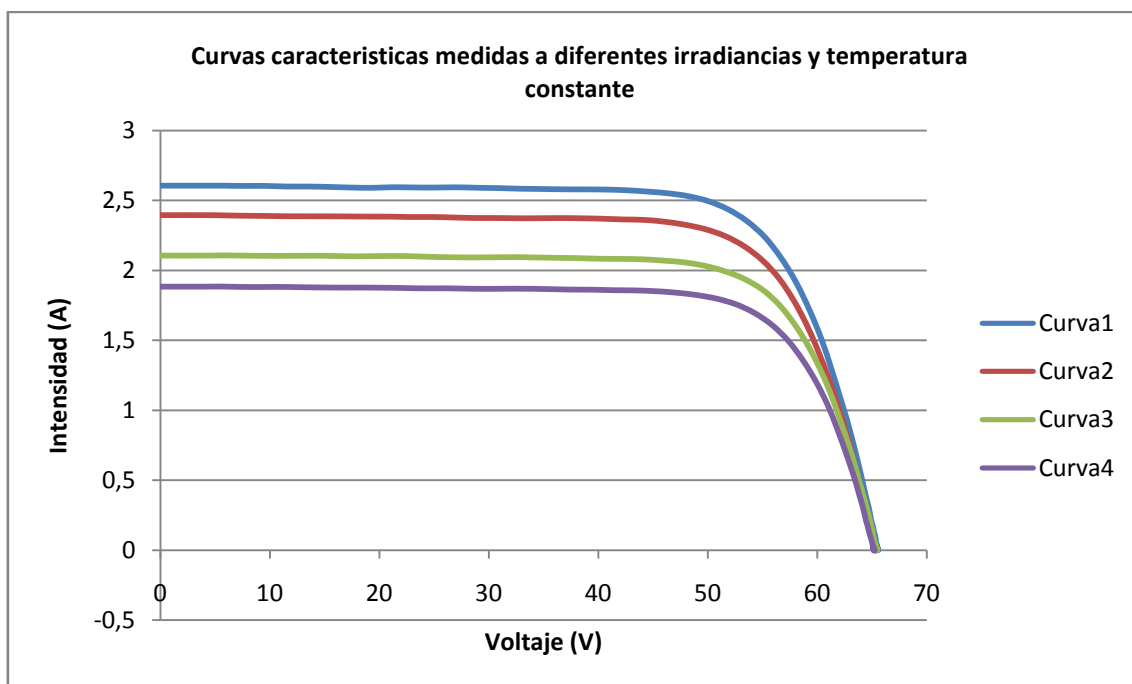


Figura 60. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s' (\Omega)$	0.56	0.67	0.53
a	0.003	0.004	0.003

**Tabla 14. Valores  $R_s'$ .**

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s'=0.5866667 \Omega$  y el valor de a es:  $a=0.003$ .

#### Cálculo de $k'$ :

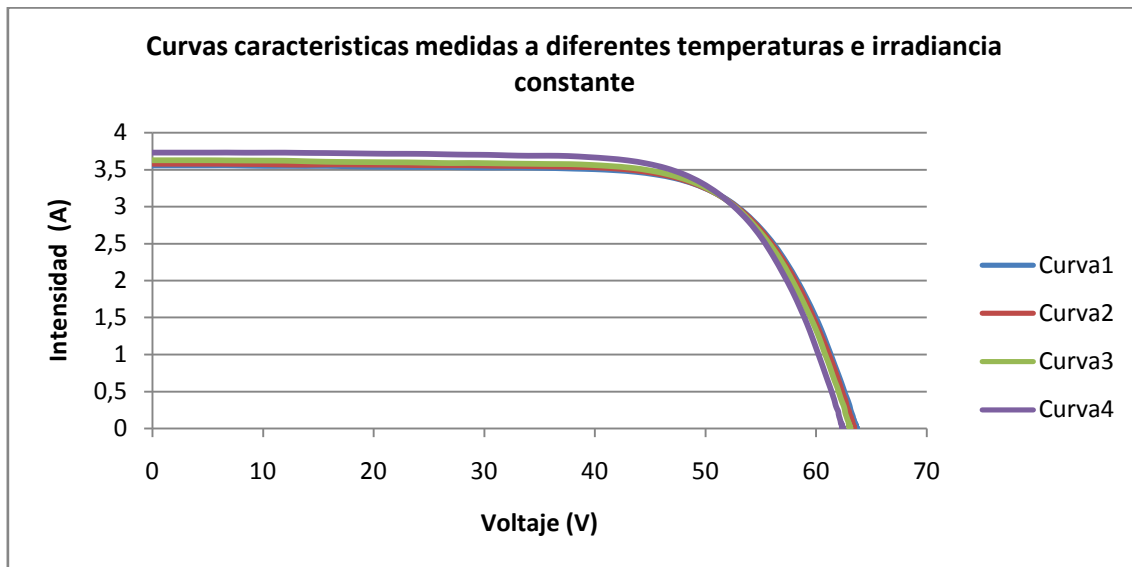
Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1= 44.517 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2= 47.257 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3= 50.776 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4= 54.178^\circ\text{C}$



**Figura 61. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.**

El valor de  $k'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 ( $G=1000$ $W/m^2$ )	Grupo 2 ( $G=800$ $W/m^2$ )	Grupo 3 ( $G=600$ $W/m^2$ )
$k'(\Omega/K)$	0.007	0.016	0.012

**Tabla 15. Valores  $k'$ .**

Así pues, el valor del factor de corrección para este módulo es:  $k'=0.0116667 \Omega/K$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1 = 40.175\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 1018.337\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 25.943\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 678.4410\text{ W/m}^2$$

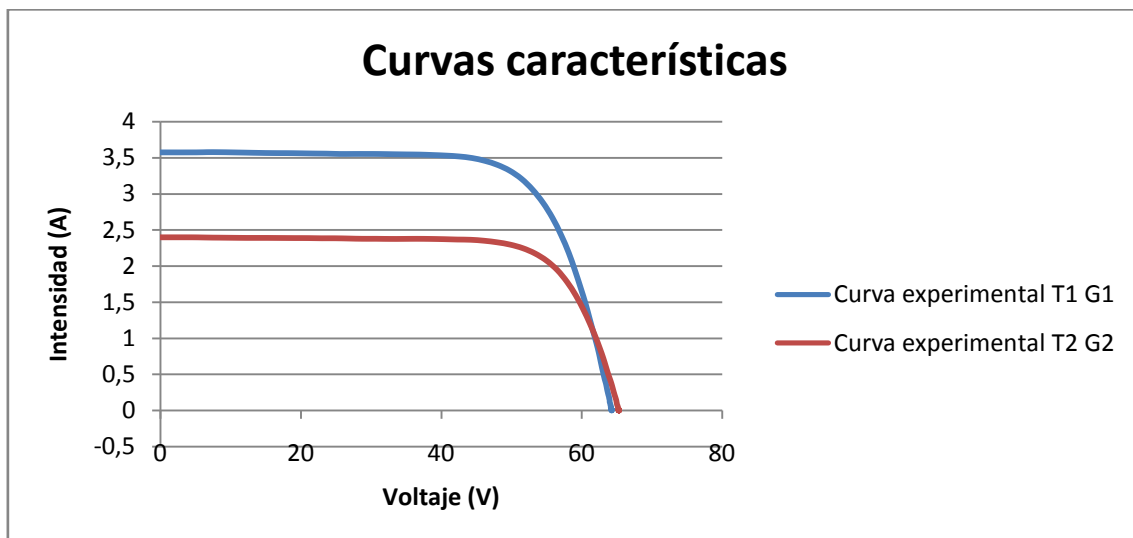


Figura 62. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

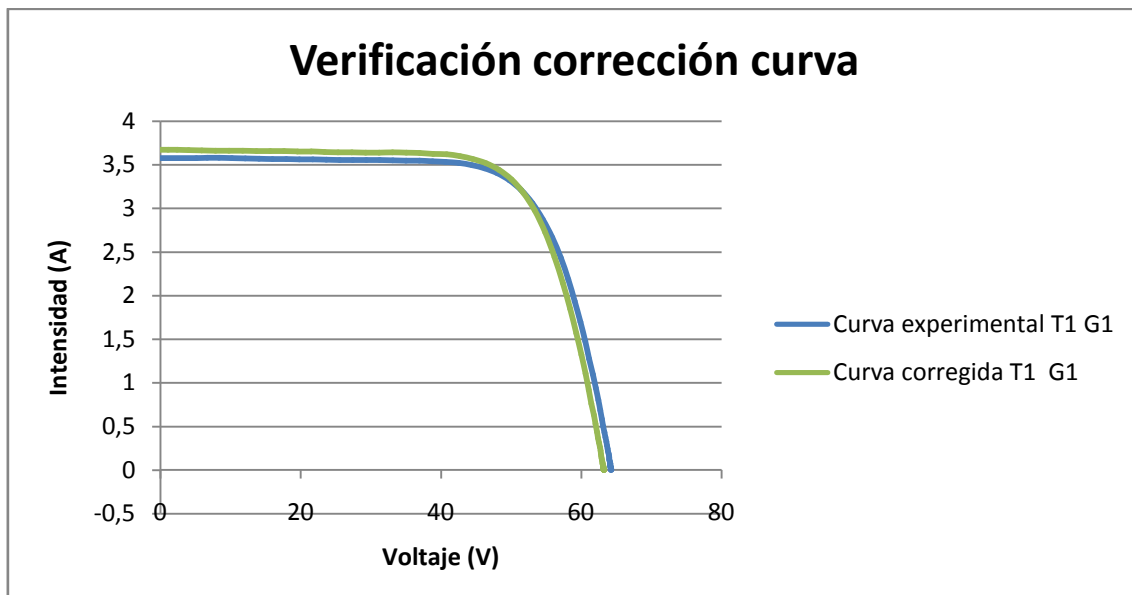
El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para

llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.



**Figura 63. Verificación de la corrección de la curva.**



#### 6.2.4. Módulo D

##### Cálculo de $R_s'$ y $a$ :

El proceso de cálculo de la resistencia interna serie  $R_s'$  es el mismo que en el procedimiento 1 y el cálculo del parámetro  $a$  se hace al mismo tiempo que el de  $R_s'$ .

Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico ( $R_s'$ ) se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a temperatura constante de 25º y a distintas irradiancias.

Curva 1:  $G_1 = 528.46829 \text{ W/m}^2$

Curva 2:  $G_2 = 461.76488 \text{ W/m}^2$

Curva 3:  $G_3 = 434.3686 \text{ W/m}^2$

Curva 4:  $G_4 = 408.47622 \text{ W/m}^2$

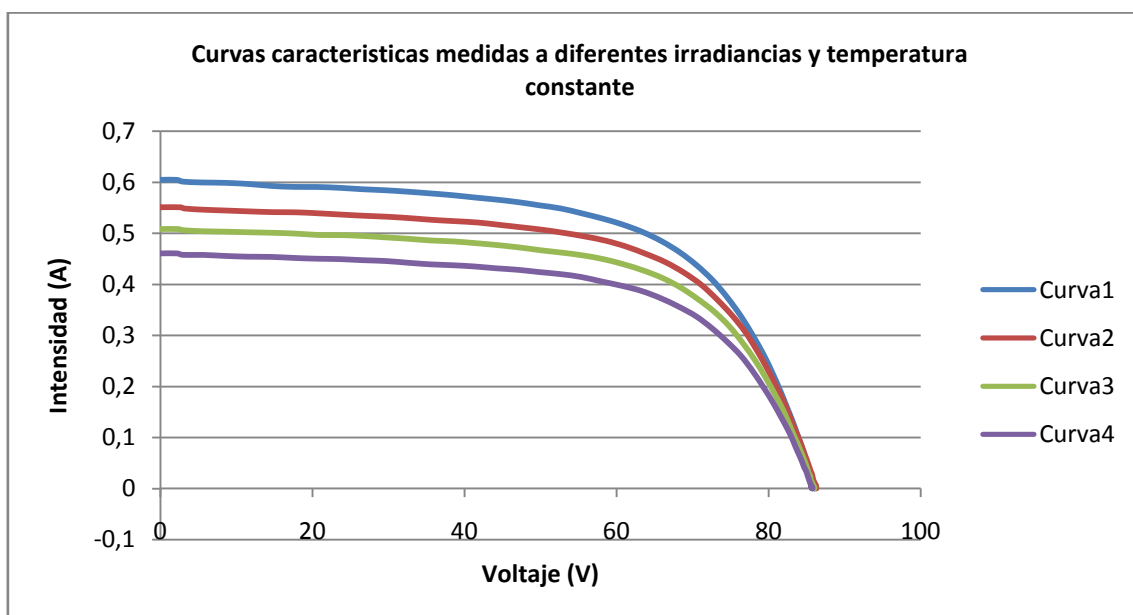


Figura 64. Curvas características medidas a diferentes irradiancias y temperatura constante.

El valor de  $R_s'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras temperaturas constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $R_s'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 (T=25º)	Grupo 2 (T=40º)	Grupo 3 (T=50º)
$R_s'(\Omega)$	0.14	0.25	0.21
a	0.001	0.001	0.001

**Tabla 16. Valores  $R_s'$ .**

Así pues, el valor de la resistencia interna serie para este módulo es:  $R_s'=0.2 \Omega$  y el valor de a es:  $a=0.001$ .

#### Cálculo de $k'$ :

Para determinar el valor del factor de corrección del módulo fotovoltaico k se ha partido de cuatro curvas características medidas bajo ensayo a irradiancia constante de  $1000 \text{ W/m}^2$  y distintas temperaturas.

Curva 1:  $T_1= 40.351 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 2:  $T_2= 46.52 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 3:  $T_3= 51.185 \text{ }^\circ\text{C}$

Curva 4:  $T_4= 54.680 \text{ }^\circ\text{C}$

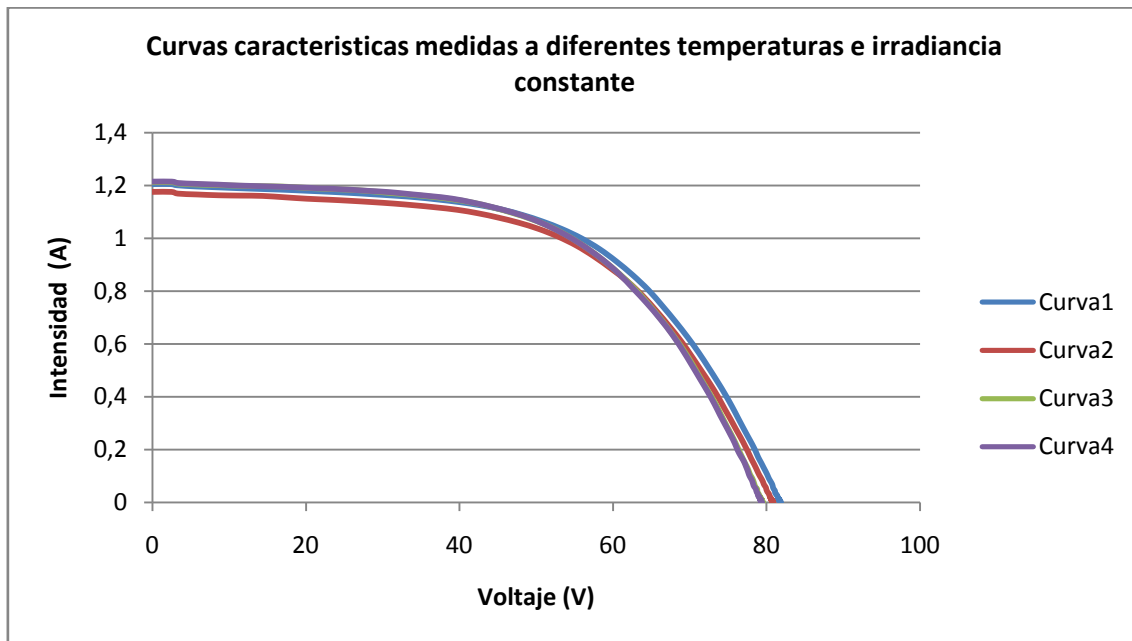


Figura 65. Curvas características medidas a diferentes temperaturas e irradiancia constante.

El valor de  $k'$  es el obtenido de aplicar las ecuaciones citadas en el capítulo 5 y para que éste fuera lo más fiable posible, se ha repetido el mismo proceso de cálculo para otros grupos de curvas medidas de dispositivo bajo ensayo y a otras irradiancias constantes distintas.

Finalmente, el valor de  $k'$  que se ha utilizado para la verificación es el resultado de la media de estos tres valores.

	Grupo 1 ( $G=1000$ $W/m^2$ )	Grupo 2 ( $G=800$ $W/m^2$ )	Grupo 3 ( $G=600$ $W/m^2$ )
$k'(\Omega/K)$	0.067	0.036	0.012

Tabla 17. Valores  $k'$ .

Así pues, el valor del factor de corrección para este módulo es:  $k'=0.0383333 \Omega/K$

Una vez obtenidos los valores de los parámetros se ha procedido a la verificación de que la traslación de curvas realmente funciona.

Se toman dos curvas cualesquiera medidas en dispositivo bajo ensayo en unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ .

Curva 1:  $T_1 = 50.142\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 922.65951\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 41.668\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 815.1589\text{ W/m}^2$$

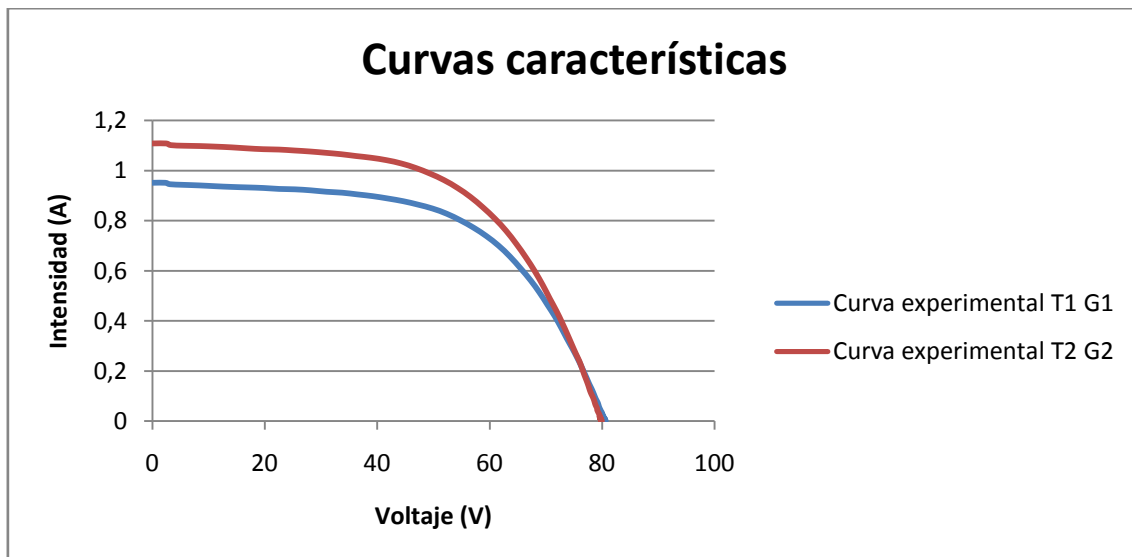


Figura 66. Curvas a distintas condiciones de temperatura e irradiancia.

El propósito de esta verificación es el de aplicar a la curva 2 las ecuaciones de corrección citadas en el capítulo 5 con los valores de los parámetros obtenidos, para llevarlas a las mismas condiciones de temperatura e irradiancia que las de la curva 1,  $T_1$  y  $G_1$ .

Una vez hecho esto, se obtiene una curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_1$ ,  $G_1$ .

Para comprobar que dicha curva es la correcta, se ha comparado con la curva a la que no se han aplicado los factores de corrección y así se puede apreciar si estas coinciden.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

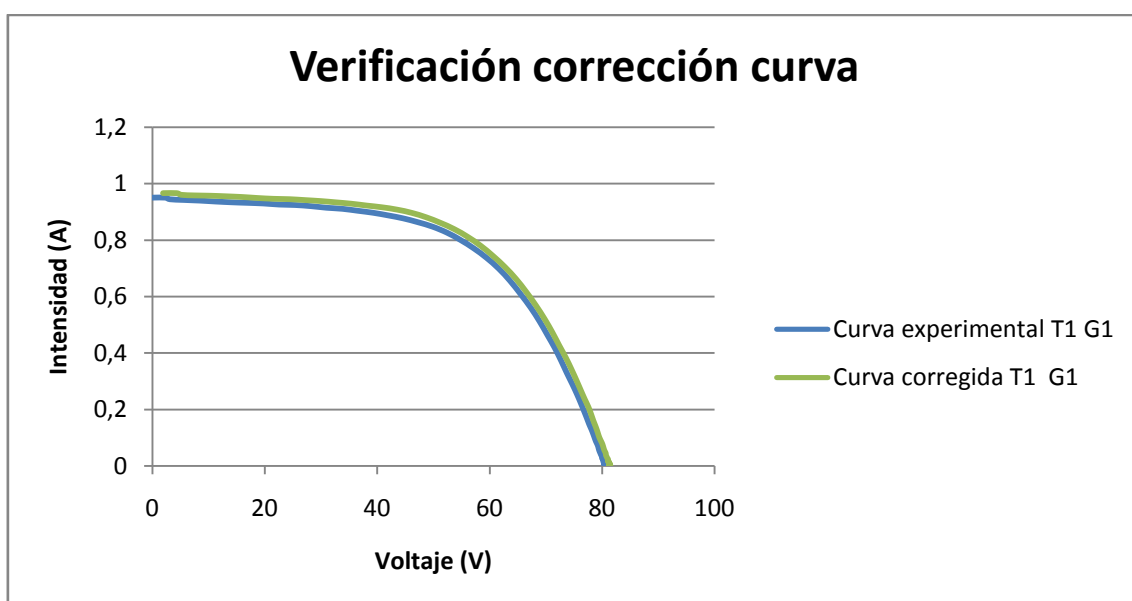


Figura 67. Verificación de la corrección de la curva.

### 6.3. PROCEDIMIENTO 3

Este procedimiento se basa en la interpolación o extrapolación lineal de dos, tres y cuatro curvas características I-V medidas.

No requiere parámetros de corrección o parámetros de ajuste pero ha sido necesario programar una macro en la plantilla de Excel para poder realizar los cálculos. El código de esta programación se puede consultar en el apartado de ANEXOS.

#### 6.3.1. Módulo A

##### Corrección para temperatura e irradiancia para dos curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una irradiancia  $G_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 47.46 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 954.7646 \text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 39.36 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 618.7028 \text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 37.4963\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 877.4329\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 50.356\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 877.4329\text{ W/m}^2$$

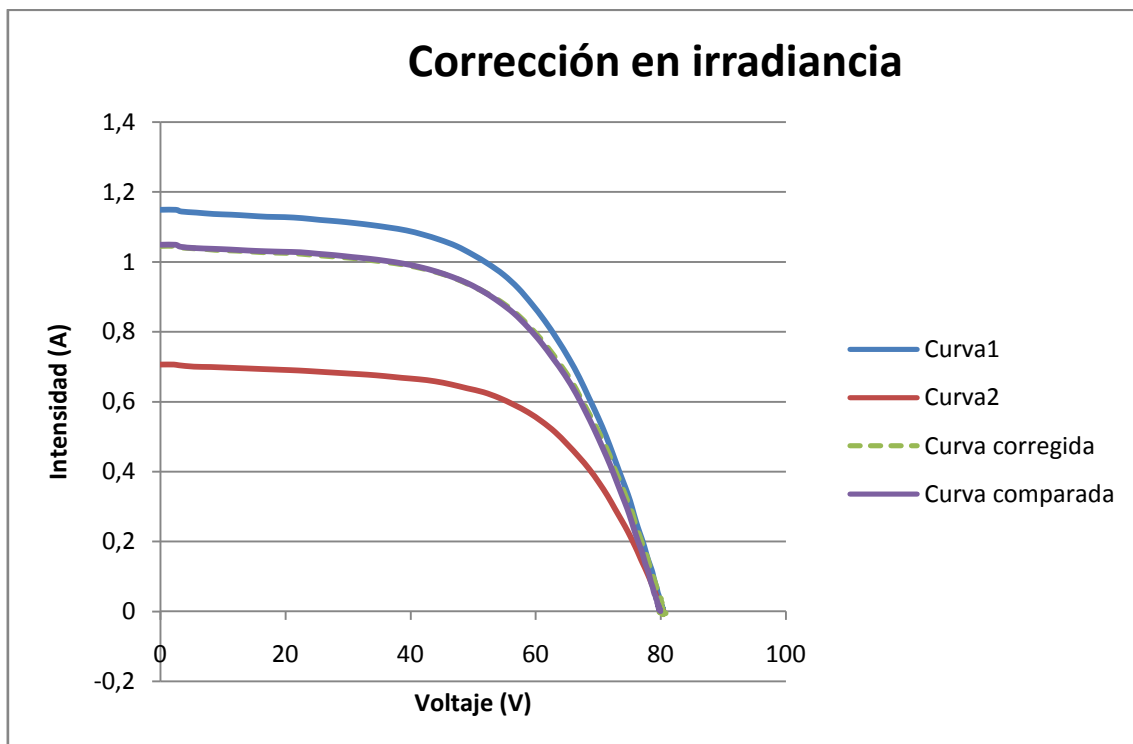


Figura 68. Corrección en irradiancia.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una temperatura  $T_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 53.496\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 886.505\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 44.902\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 911.6720\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 53.708\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 885.8841\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 53.708\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 876.269\text{ W/m}^2$$



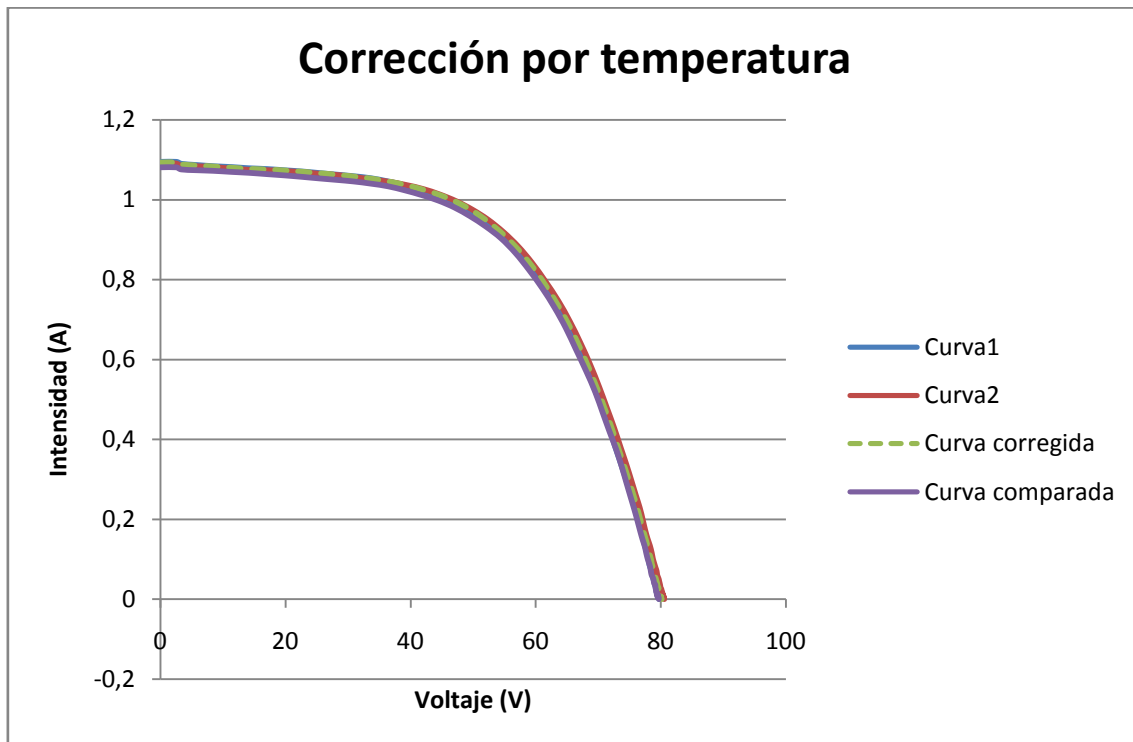


Figura 69. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para tres curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido tres curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 47.46\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 954.7646\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 53.601\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 998.36476\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 44.605\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 711.9052\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 53.496\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 886.505\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 49.263\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 886.505\text{ W/m}^2$$

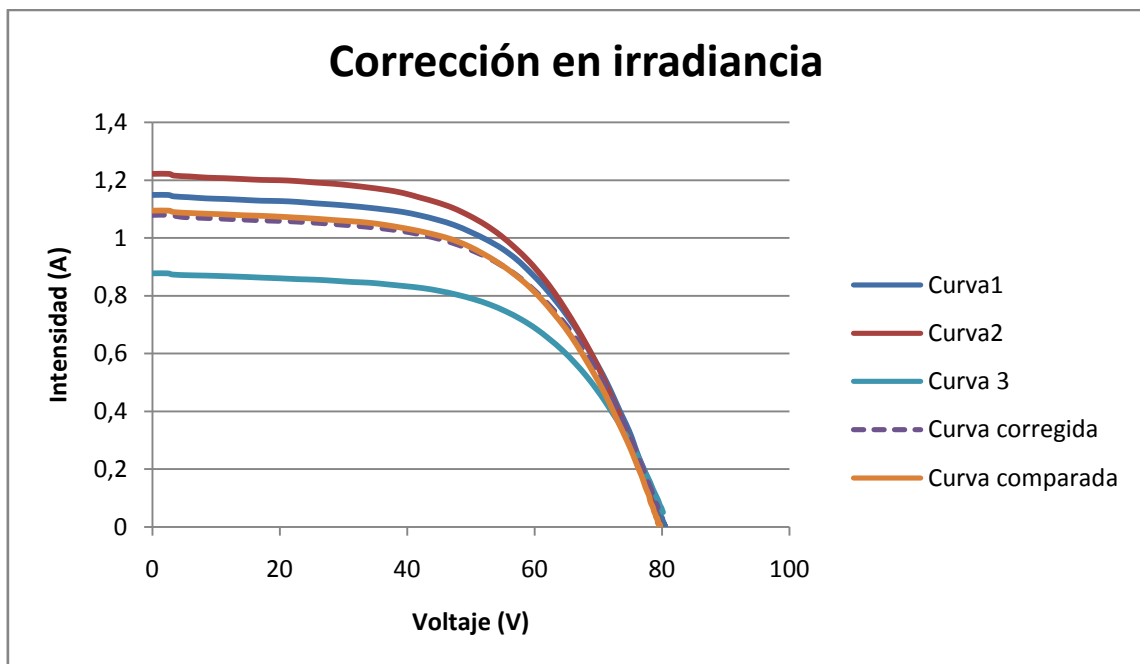


Figura 70. Corrección en irradiancia

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido tres curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 49.263\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 886.505\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 44.902\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 911.6720\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 49.838\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 884.447\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 53.496\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 934.55\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 53.496\text{ }^{\circ}\text{C}$

$G = 886.505\text{ W/m}^2$

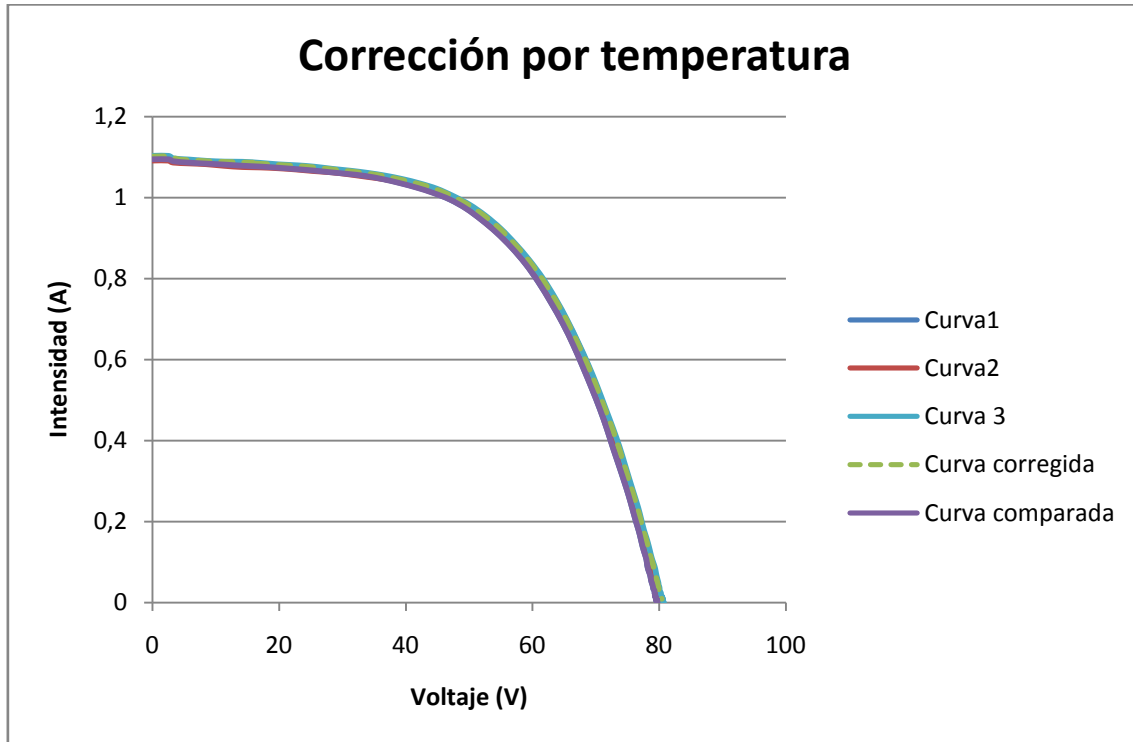


Figura 71. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para cuatro curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se ha escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 47.46 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_1 = 954.7646 \text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 39.36 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_2 = 618.7028 \text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 50.238 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_3 = 922.65951 \text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 49.838 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_4 = 884.4473 \text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 55.8367 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G_c = 954.2237 \text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 55.914 \text{ }^\circ\text{C}$

$$G = 954.2237 \text{ W/m}^2$$

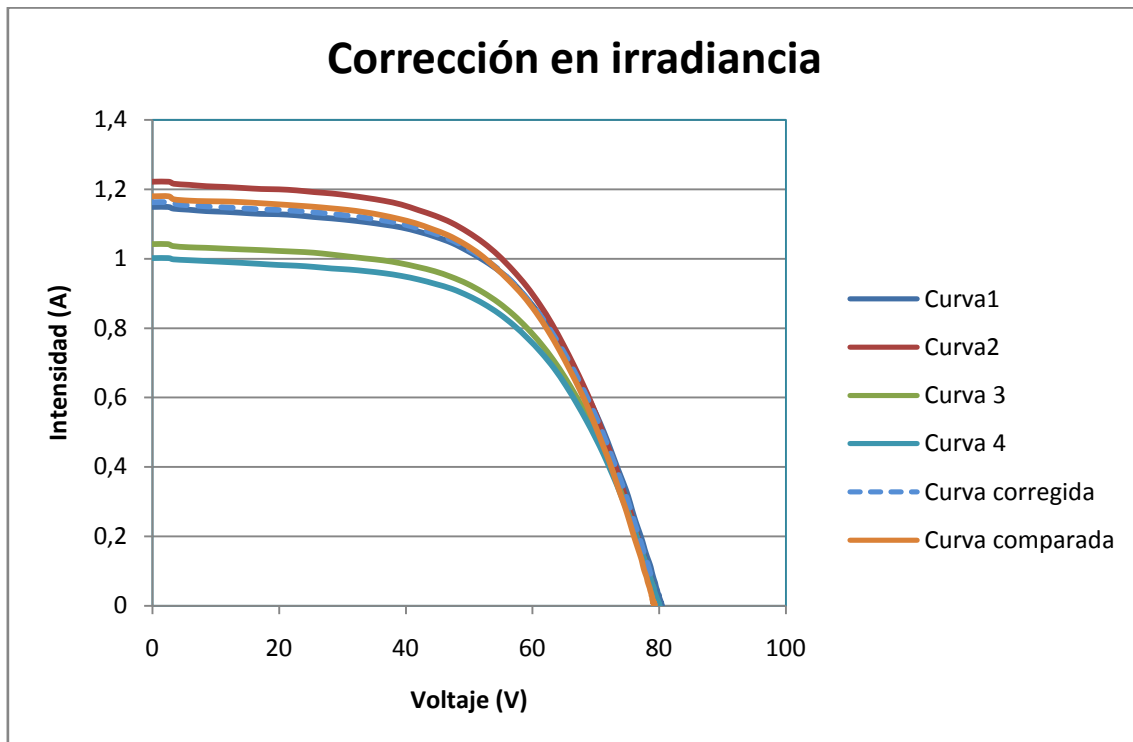


Figura 72. Corrección en irradiancia

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 49.263\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 886.505\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 44.902\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 911.6720\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 50.238\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 922.6595\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 49.838\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4 = 884.44732\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 49.573\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 903.4147\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 49.573\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 896.27902\text{ W/m}^2$$

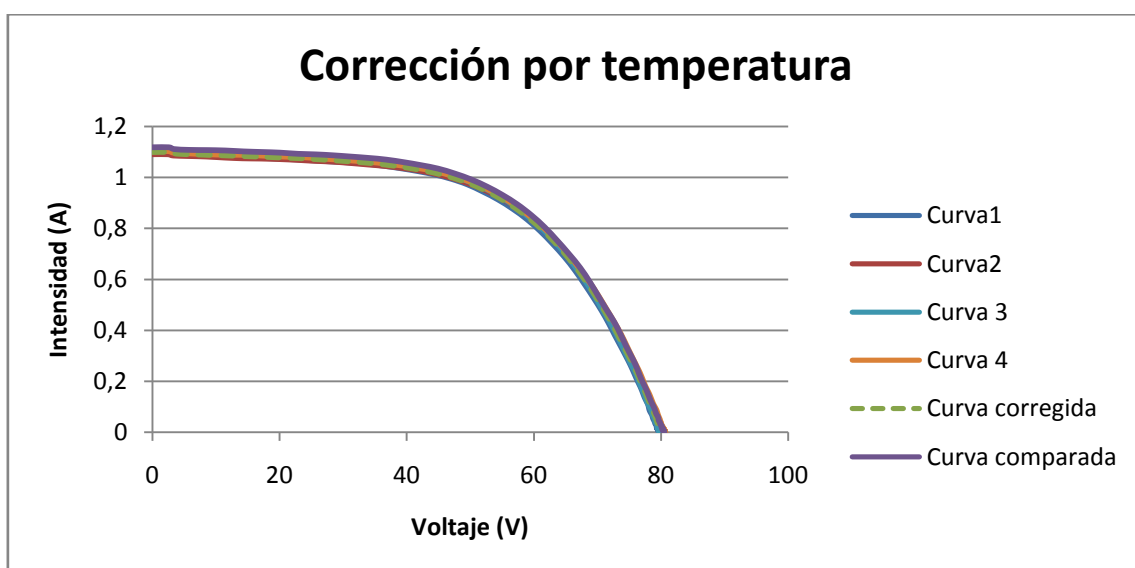


Figura 73. Corrección por temperatura

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

### 6.3.2. Módulo B

#### Corrección para temperatura e irradiancia para dos curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una irradiancia  $G_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 51.179\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 780.57402\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 51.298\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 1016.5742\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.



Curva corregida:  $T_3 = 51.3764\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 936.07402\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 50.825\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 936.07402\text{ W/m}^2$$

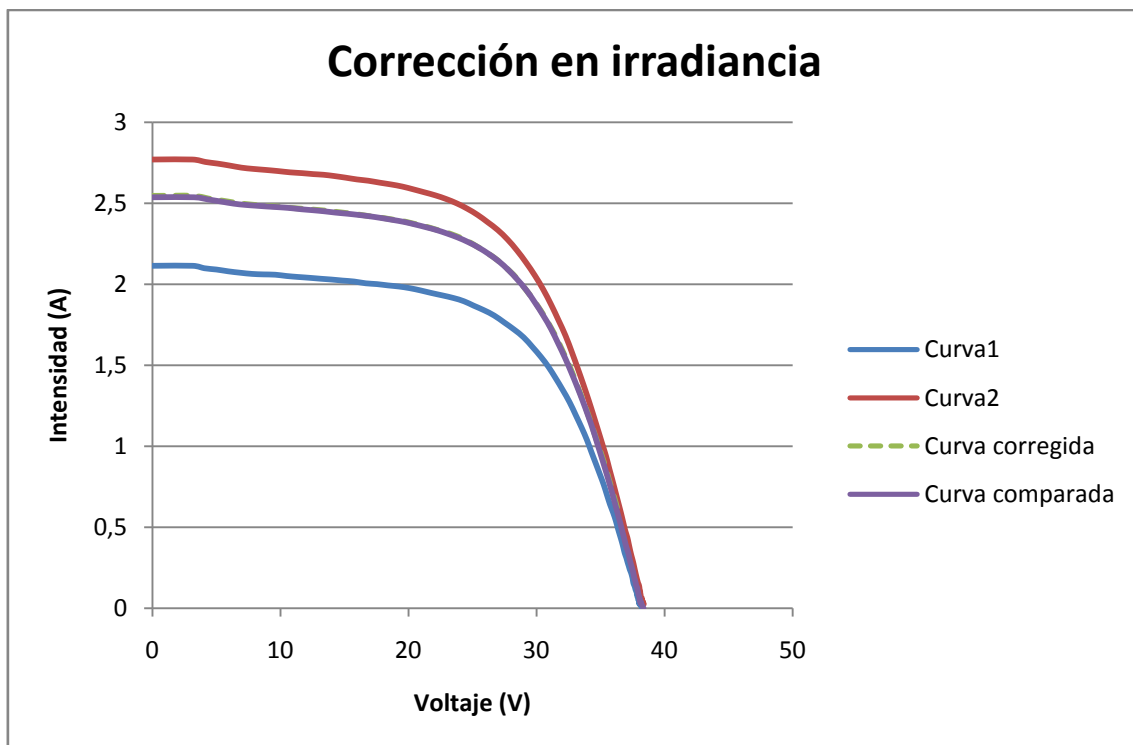


Figura 74. Corrección en irradiancia.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una temperatura  $T_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 47.143\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 981.79\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 58.608\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 997.242\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 49.263^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 984.64473\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 49.263^{\circ}\text{C}$

$$G = 984.64473\text{ W/m}^2$$

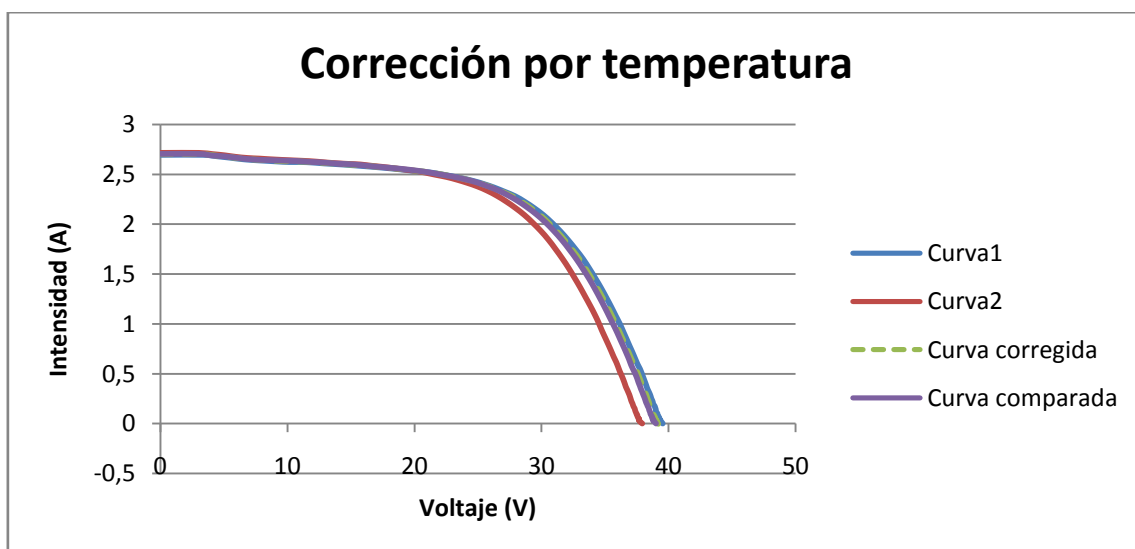


Figura 75. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

### Corrección para temperatura e irradiancia para tres curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido tres curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 51.179\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 780.5740\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 51.298\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 1016.5742\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 58.608\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 997.224\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 53.496\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 985.6826\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 49.263\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 985.6826\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

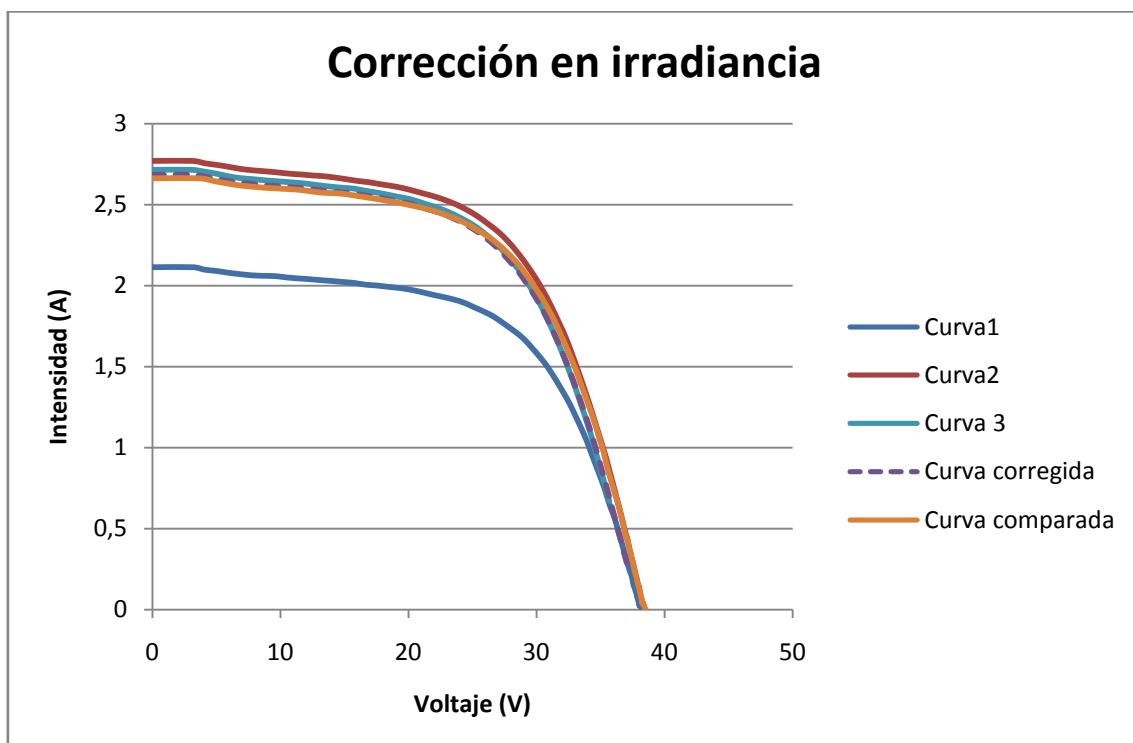


Figura 76. Corrección en irradiancia

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 47.143\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 981.79\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 58.608\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 997.242\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 55.495\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 1002.62\text{ W/m}^2$$

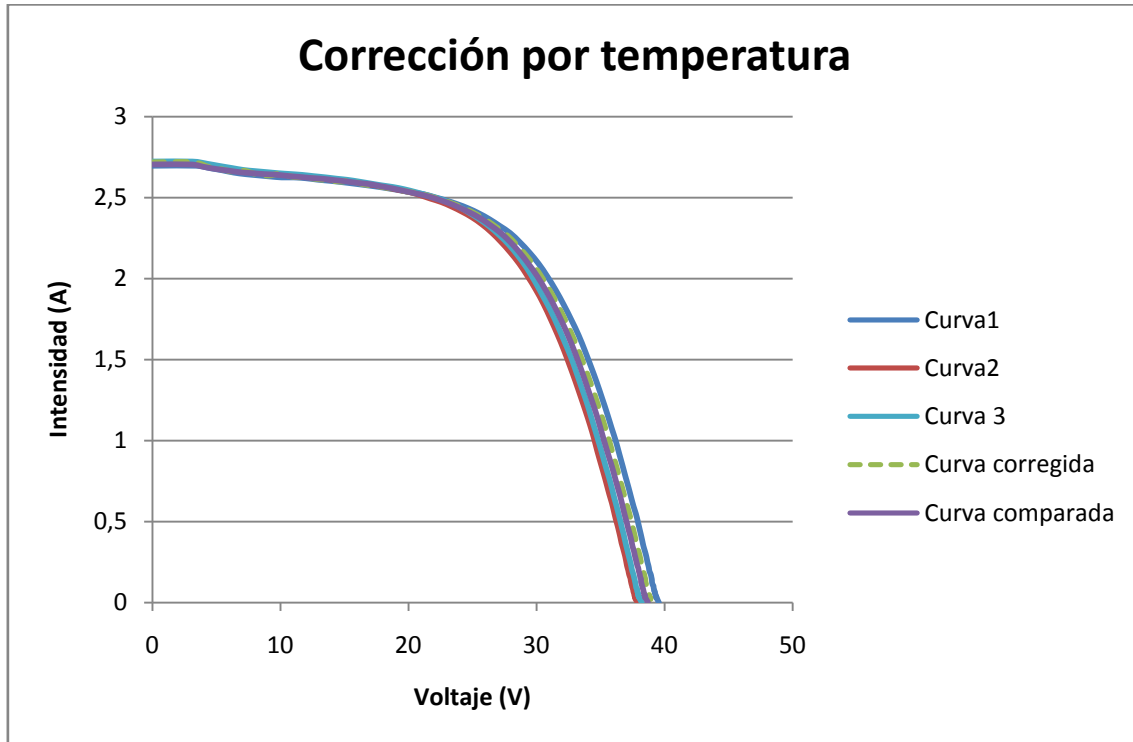
Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 50.606\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 986.4525\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 50.606\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 998.71\text{ W/m}^2$$



**Figura 77. Corrección por temperatura.**

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para cuatro curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 51.179\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 780.57402\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 51.298\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 1016.5742\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 53.436\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 907.9656\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 58.608\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4 = 997.224\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 53.56\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 952.6278\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 54.352\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 952.6278\text{ W/m}^2$$

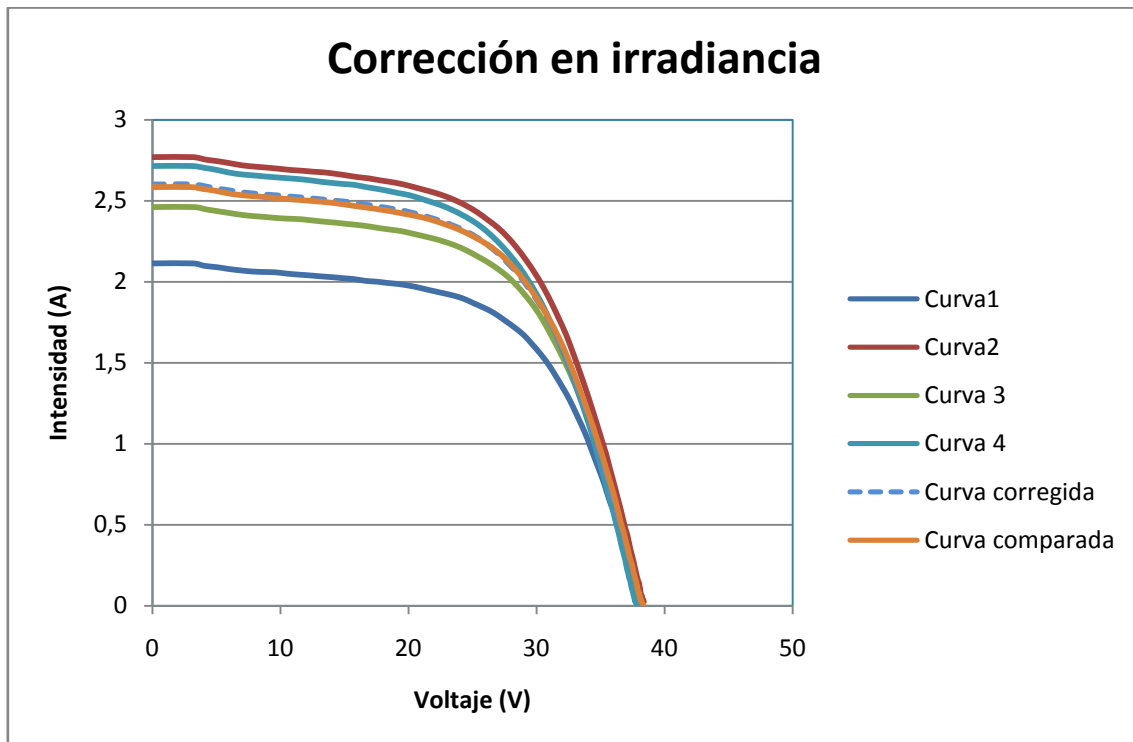


Figura 78. Corrección en irradiancia

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 47.143\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 981.79146\text{ W/m}^2$$



Curva 2:  $T_2=58.608\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2= 997.2240\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3= 50.606\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3= 986.4525\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4= 55.495\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4= 1002.6189\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c= 55.602\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c= 1002.973\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T= 55.602\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G= 1008.5545\text{ W/m}^2$$

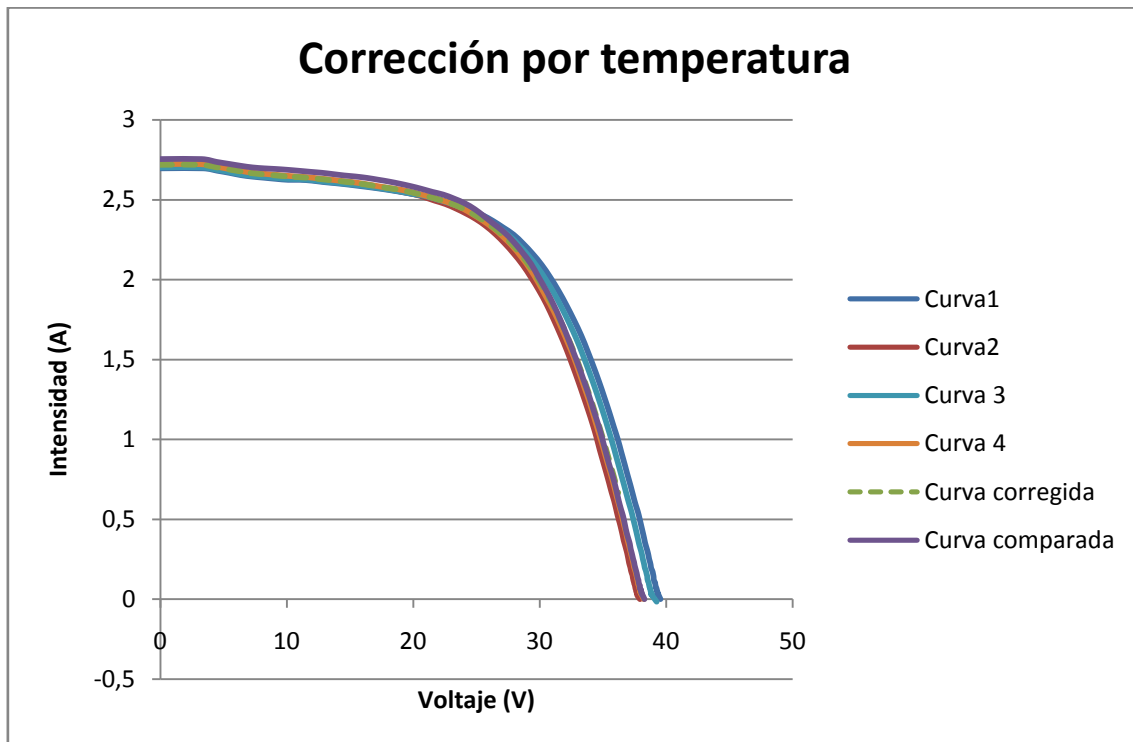


Figura 79. Corrección por temperatura

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

### 6.3.3. Módulo C

#### Corrección para temperatura e irradiancia para dos curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una irradiancia  $G_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 43.724\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 797.21557\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 49.721\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 1006.9517\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 52.8073\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 950.1550\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 48.179\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 950.1550\text{ W/m}^2$$

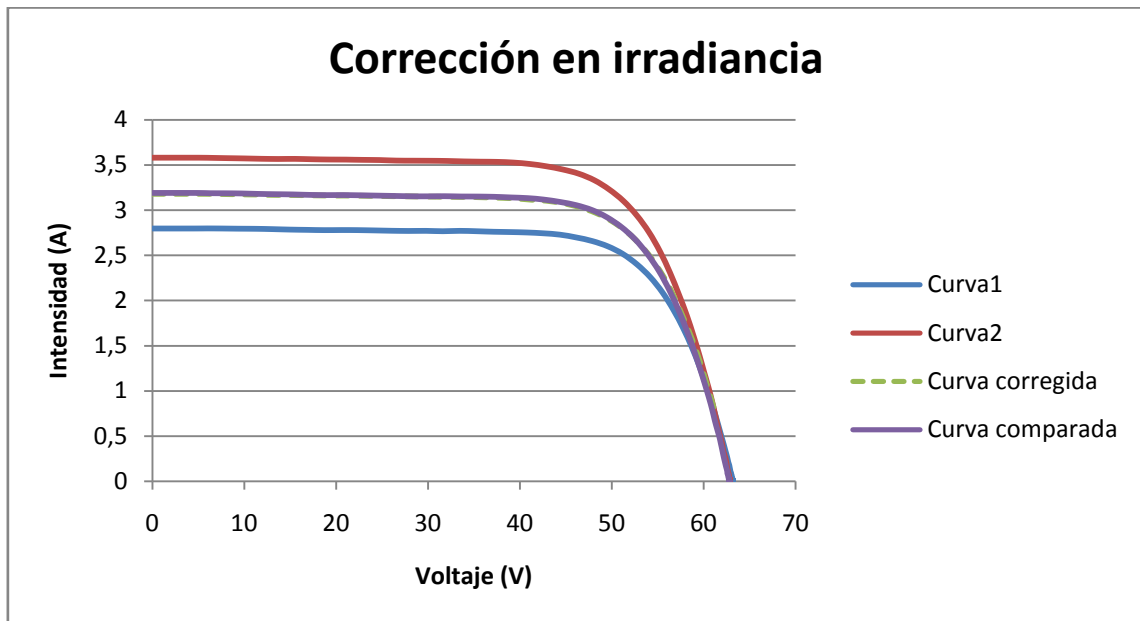


Figura 80. Corrección en irradiancia.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una temperatura  $T_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 52.085^\circ\text{C}$

$$G_1 = 1006.3215 \text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 48.509^\circ\text{C}$

$$G_2 = 999.8185 \text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 50.224\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 1001.1902\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 50.224^{\circ}\text{C}$

$$G = 1003.9504\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

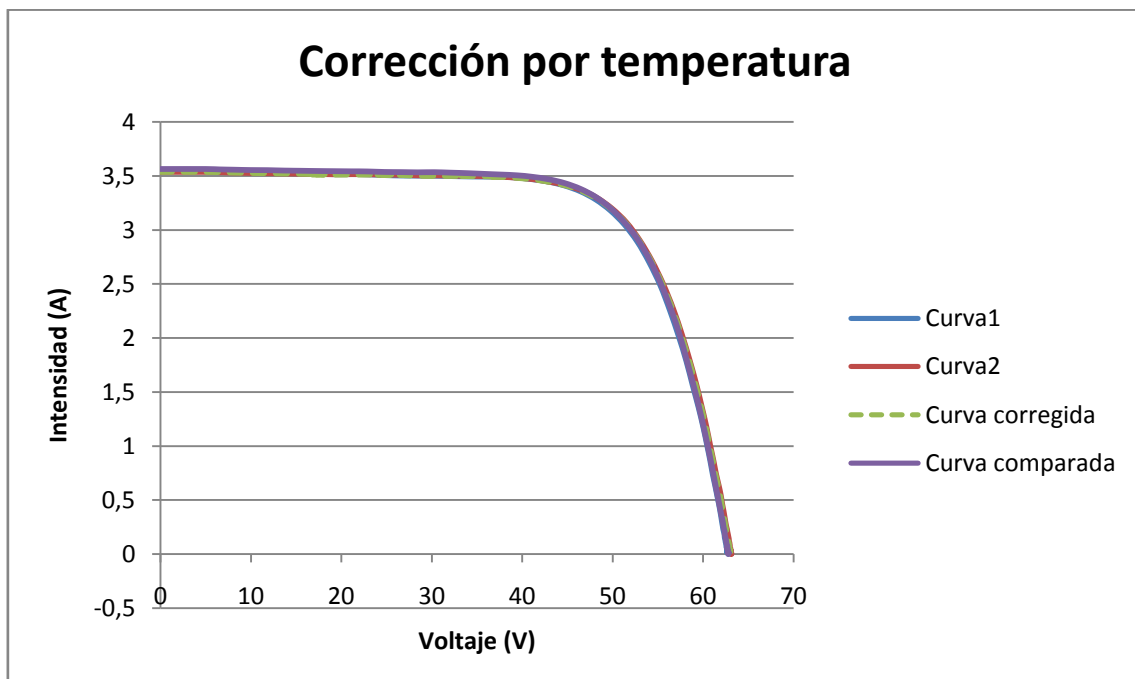


Figura 81. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para tres curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido tres curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 51.391\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 1037.2256\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 47.567\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 867.0175\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 48.669\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 969.8548\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 47.1493\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 957.1688\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 49.206\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 957.1688\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

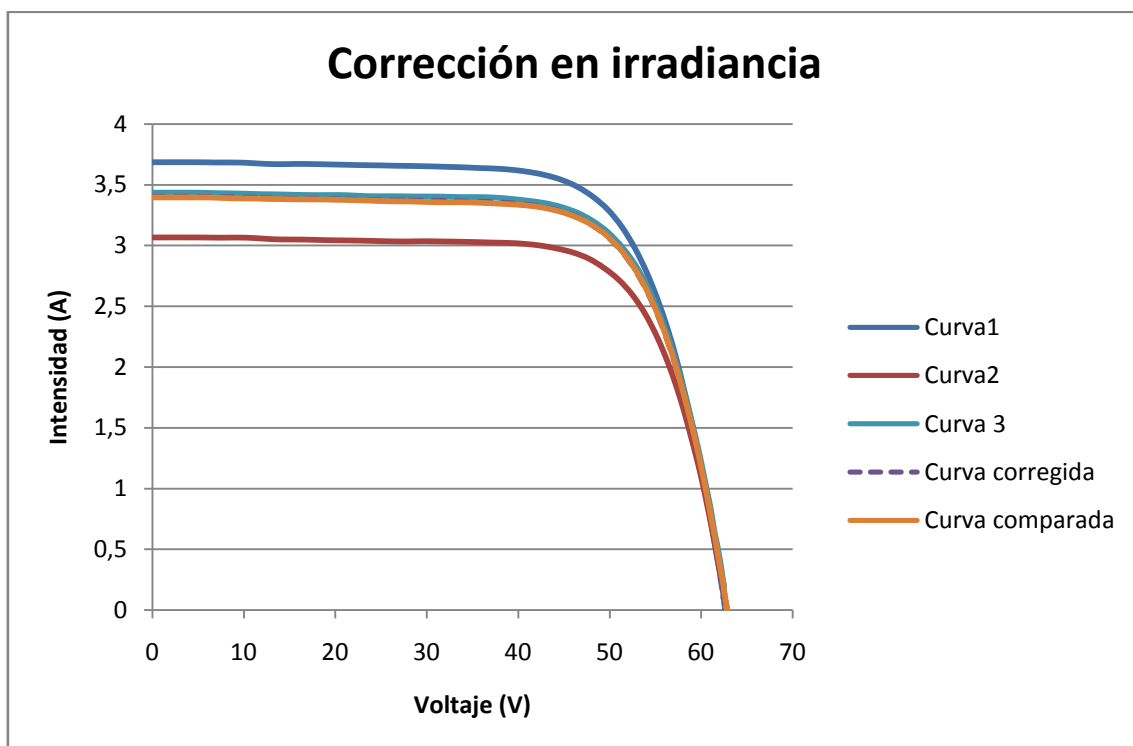


Figura 82. Corrección en irradiancia

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 42.299\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 887.7970\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 50.321\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 907.6461\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 48.179^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 905.155\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 46.782^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 900.464\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 46.782^{\circ}\text{C}$

$$G = 893.1294\text{ W/m}^2$$



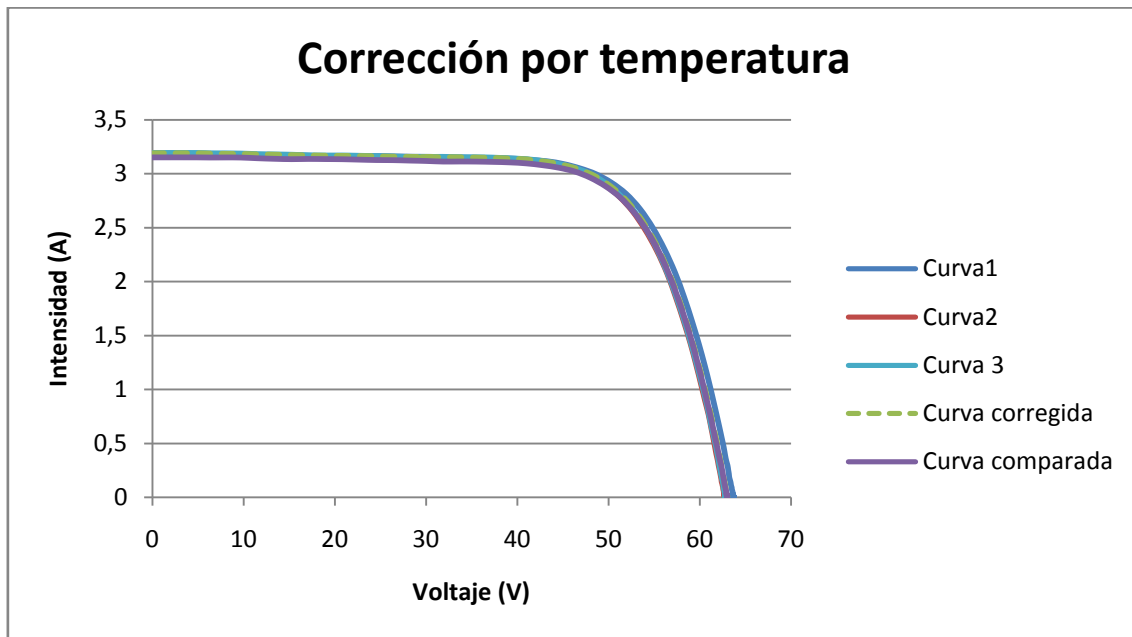


Figura 83. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para cuatro curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 51.391\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 1037.2256\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 47.567\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 867.0175\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 42.737\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 734.3566\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 48.669\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4 = 969.8548\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 51.847\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 893.12946\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 53.944\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 893.12946\text{ W/m}^2$$

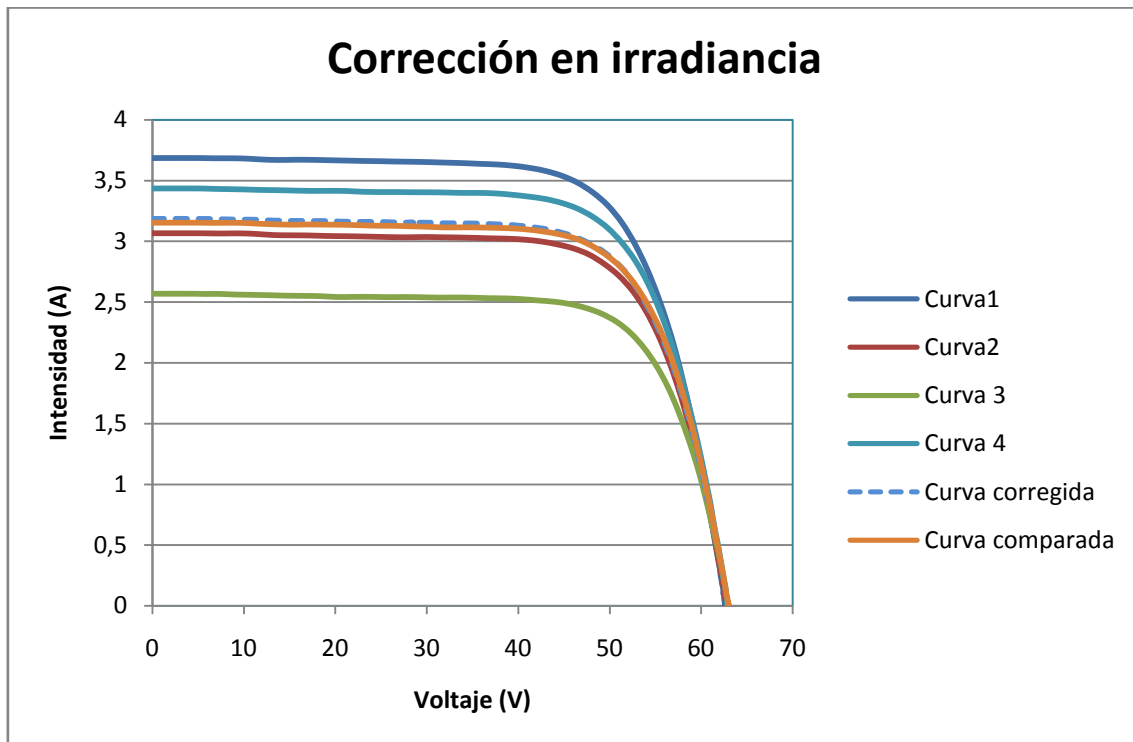


Figura 84. Corrección en irradiancia.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 42.299\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 887.7970\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 50.321\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 907.6461\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 48.179\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 905.1550\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 48.242\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4 = 891.3786\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 44.773\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 903.497\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 44.773\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 896.6792\text{ W/m}^2$$

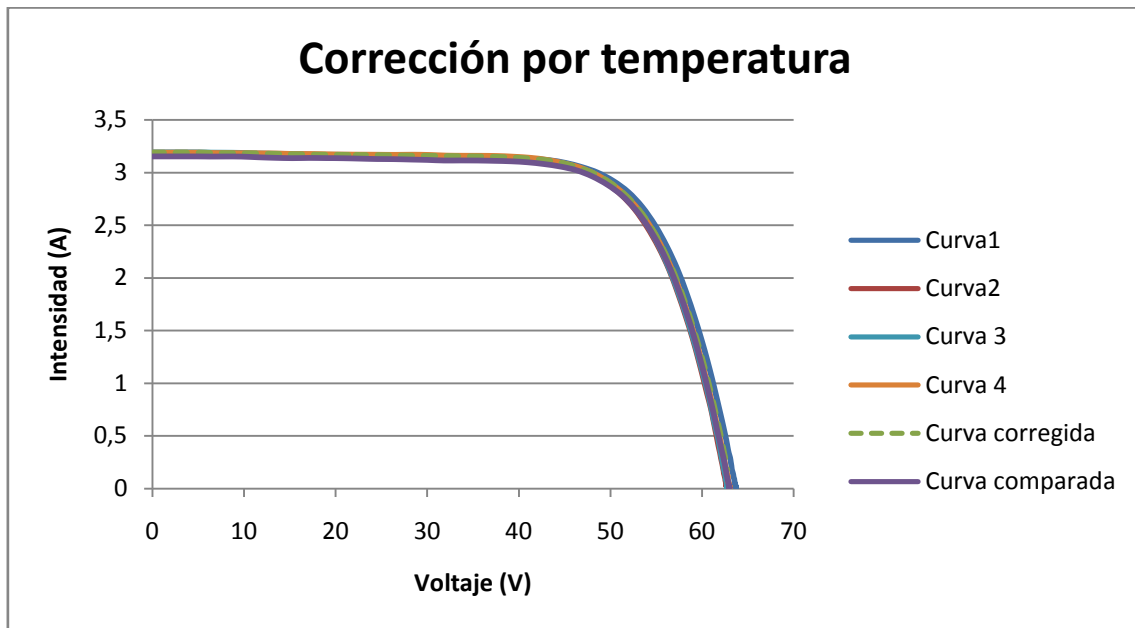


Figura 85. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### 6.3.4. Módulo D

##### Corrección para temperatura e irradiancia para dos curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una irradiancia  $G_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 49.957\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 992.5811\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 45.879\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 679.7474\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 44.2372\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 866.6409\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 49.062\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 866.6409\text{ W/m}^2$$

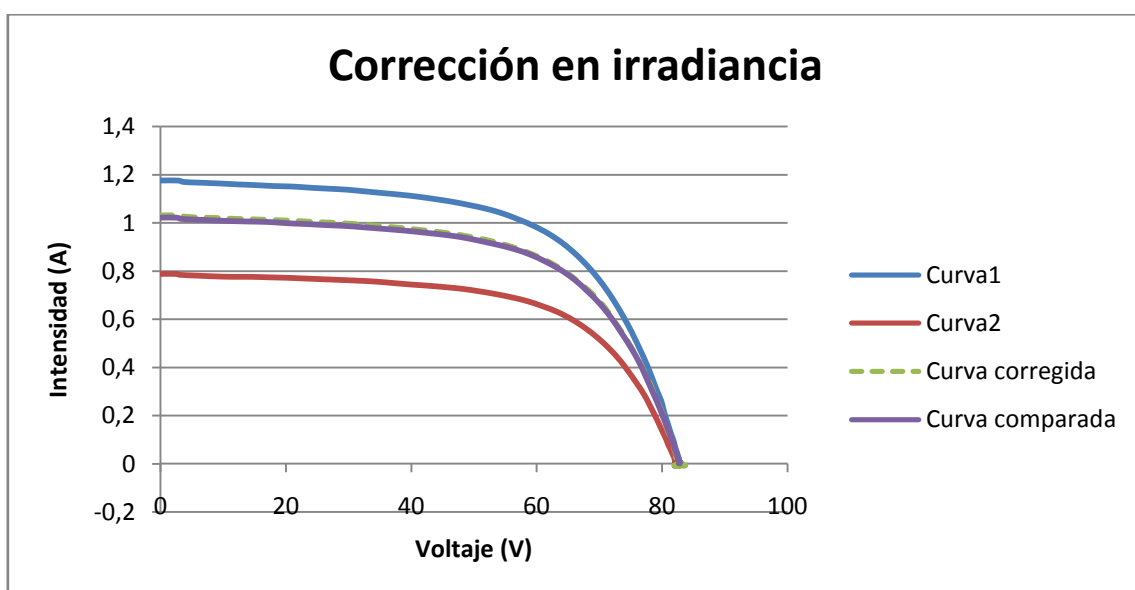


Figura 86. Corrección en irradiancia.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ , y  $T_2$ ,  $G_2$ , y se han trasladado a una temperatura  $T_3$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 40.802\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 921.9076\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 51.01\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 928.89854\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_3 = 45.263\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 875.3441\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 45.263\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 876.54\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

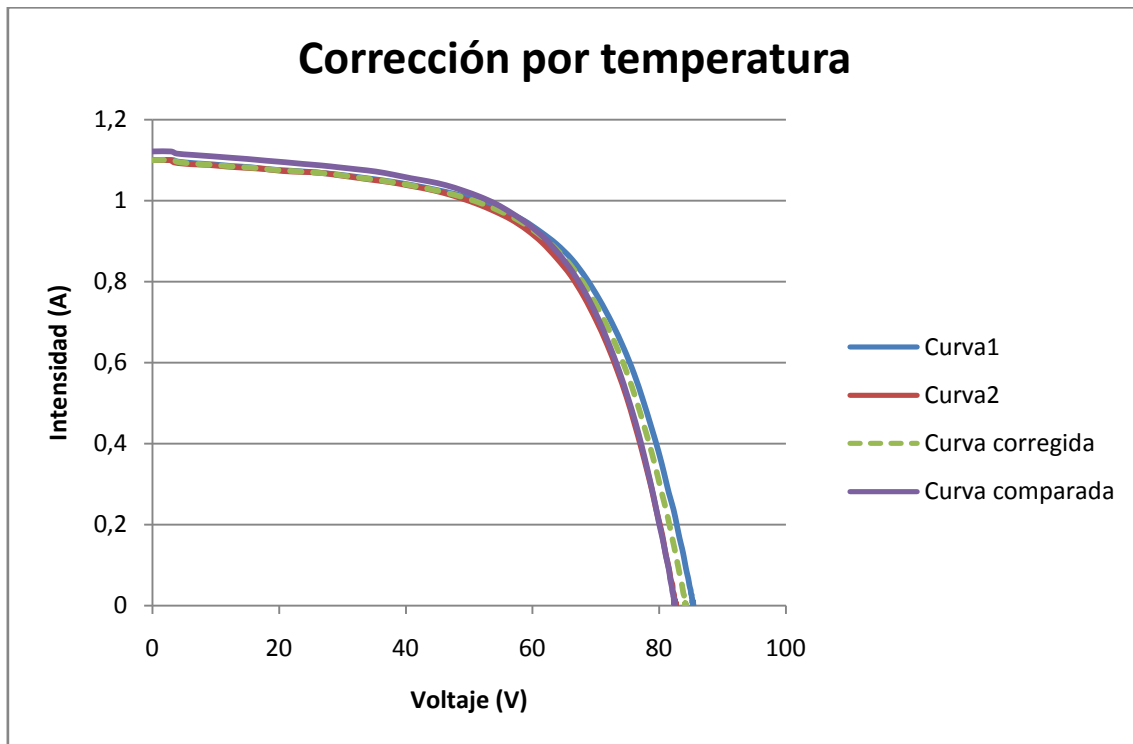


Figura 87. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para tres curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.



Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido tres curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 49.957\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 992.5811\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 45.879\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 679.7474\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 48.376\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 754.9451\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 44.9598\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 780.2706\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 47.985\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 780.2706\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_3$ ,  $G_3$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

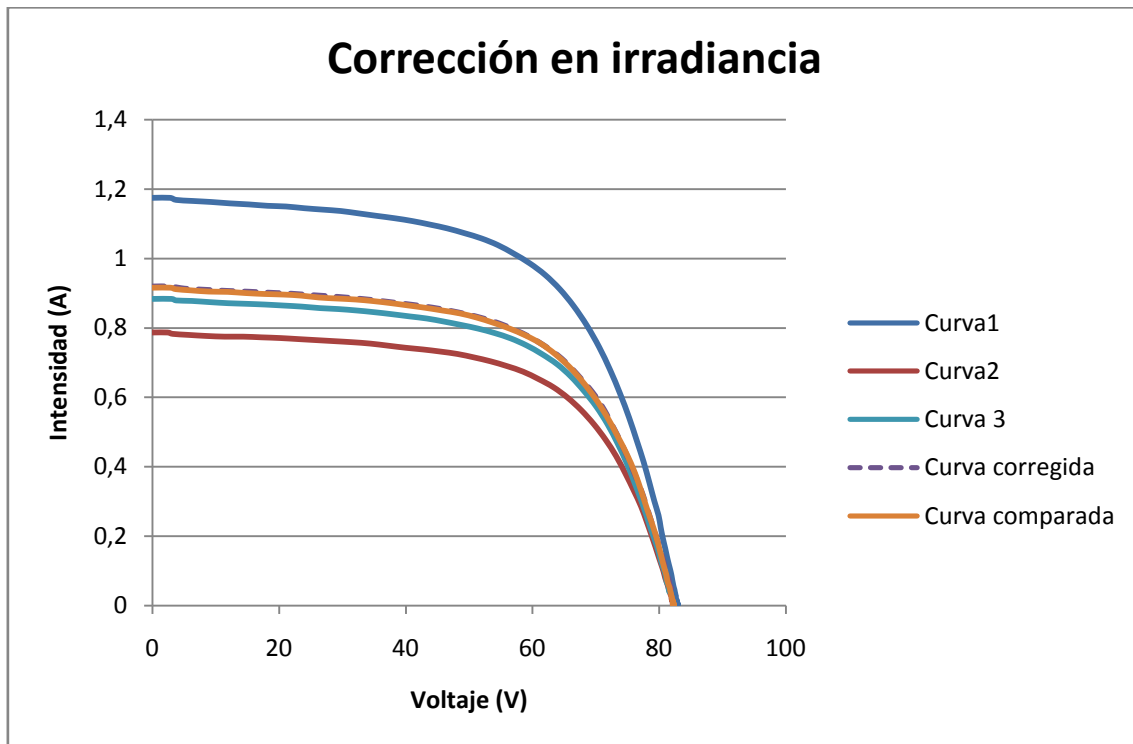


Figura 88. Corrección en irradiancia.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido dos curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ , y  $T_3$ ,  $G_3$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 40.802\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 921.9076\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 51.01\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 928.89854\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 34.566\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 942.867\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 50.707^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 925.0326\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 50.707^{\circ}\text{C}$

$$G = 939.7227\text{ W/m}^2$$

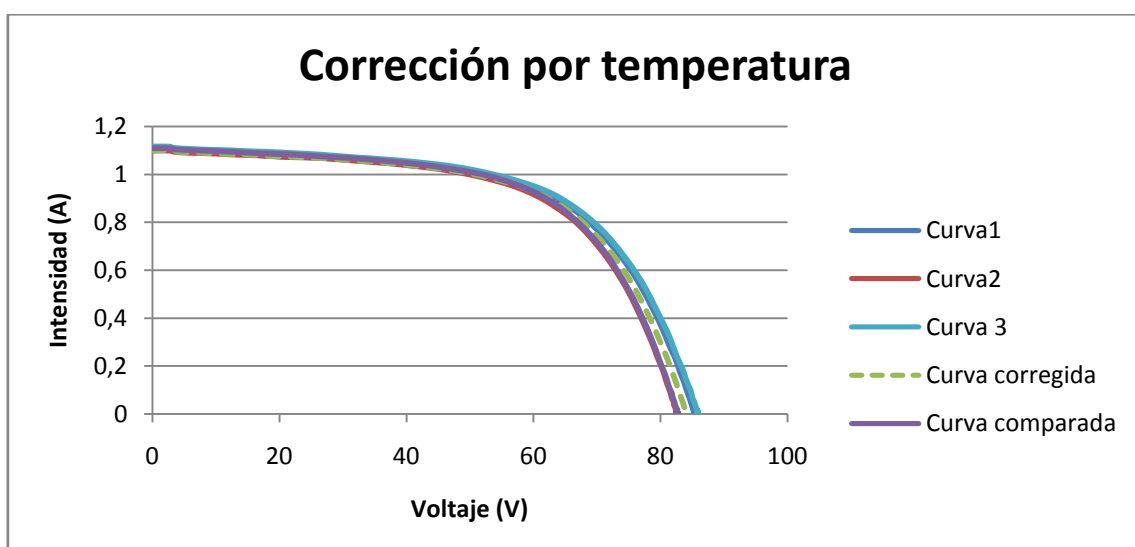


Figura 89. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

#### Corrección para temperatura e irradiancia para cuatro curvas I-V medidas

- Corrección en irradiancia.

Para llevar a cabo la corrección en irradiancia se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 39.037\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 906.4354\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 39.603\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 960.95085\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 37.888\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 869.0016\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 36.447\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4 = 822.9148\text{ W/m}^2$$

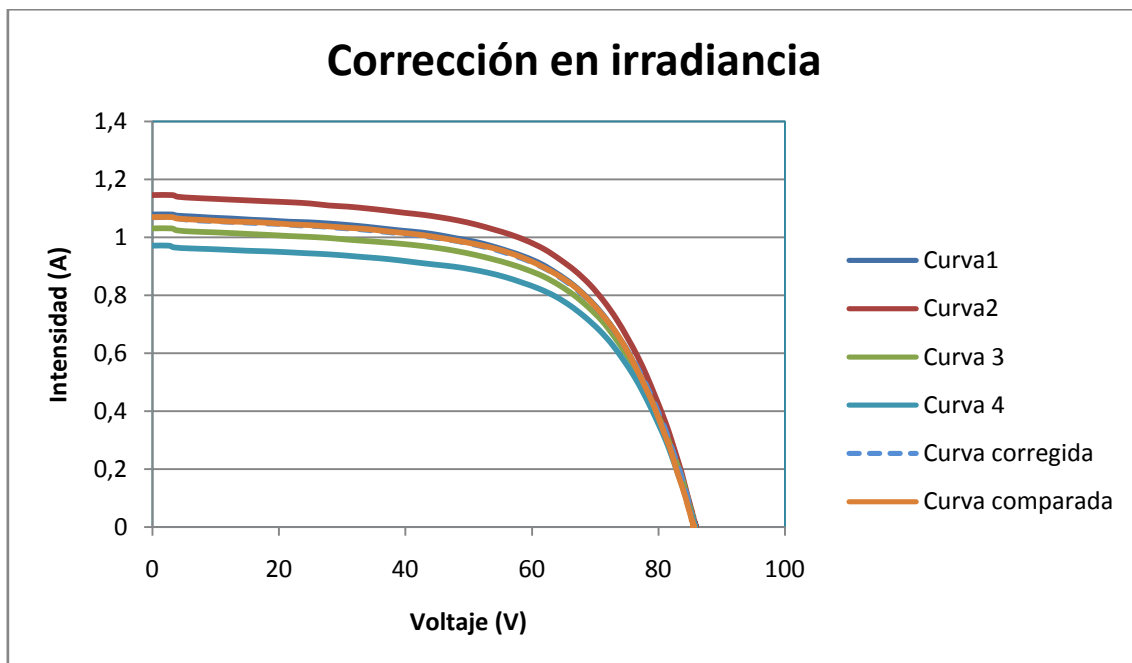
Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 55.8367\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 830.6826\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 55.9144\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 830.6826\text{ W/m}^2$$



**Figura 90. Corrección en irradiancia**

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

- Corrección por temperatura.

Para llevar a cabo la corrección por temperatura se han escogido cuatro curvas I-V medidas en dispositivo bajo ensayo a unas condiciones  $T_1$ ,  $G_1$ ,  $T_2$ ,  $G_2$ ,  $T_3$ ,  $G_3$  y  $T_4$ ,  $G_4$  se han trasladado a una irradiancia  $G_c$  deseada.

Curva 1:  $T_1 = 40.802\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_1 = 921.9076\text{ W/m}^2$$

Curva 2:  $T_2 = 51.01\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_2 = 928.89854\text{ W/m}^2$$

Curva 3:  $T_3 = 46.353\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_3 = 952.1001\text{ W/m}^2$$

Curva 4:  $T_4 = 58.29\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_4 = 960.7126\text{ W/m}^2$$

Una vez hallada la nueva curva en condiciones de temperatura e irradiancia  $T_c$ ,  $G_c$  se ha procedido a compararla con una curva medida en dispositivo bajo ensayo en las mismas condiciones.

Curva corregida:  $T_c = 48.873\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_c = 913.4157\text{ W/m}^2$$

Curva comparada:  $T = 48.873\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G = 910.325\text{ W/m}^2$$

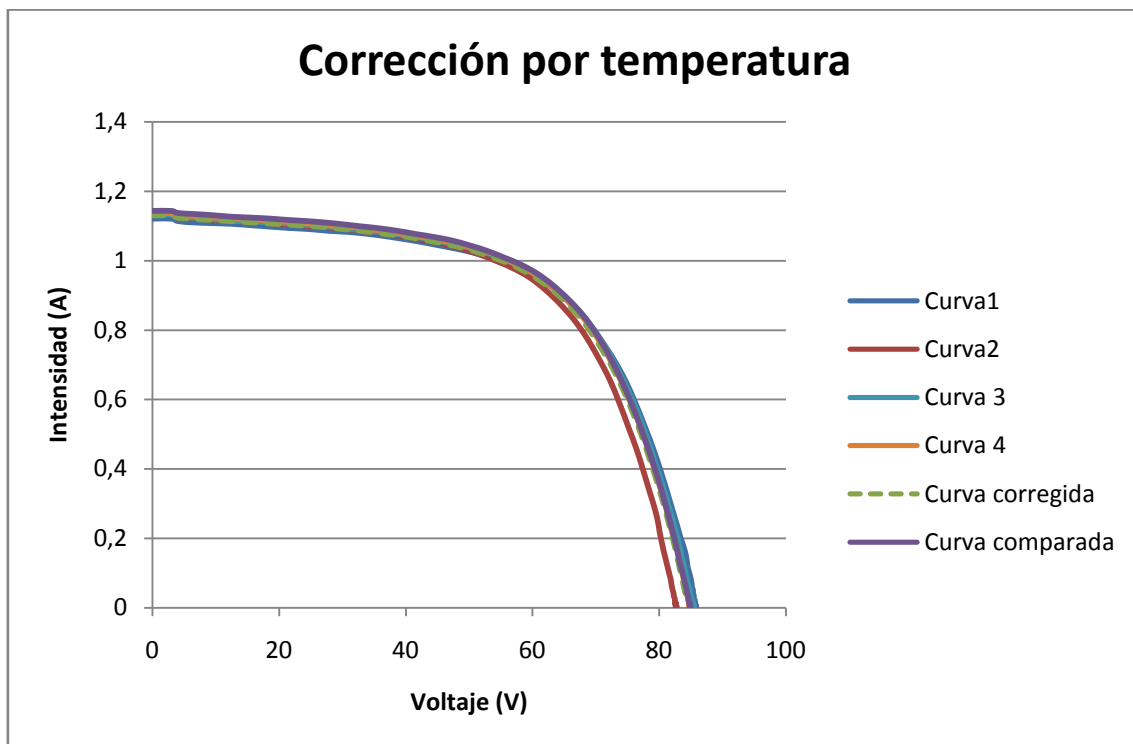


Figura 91. Corrección por temperatura.

El resultado muestra que las curvas casi se solapan, por lo que se ha verificado que este procedimiento de corrección de curvas funciona.

# **CAPÍTULO 7**

## **CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**



## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En vista de los resultados obtenidos en el capítulo 6, se puede decir que para el Procedimiento 1 de corrección, en los módulos A, B, C y D se han obtenido unas curvas características corregidas que prácticamente coinciden con la correspondiente curva característica medida en las mismas condiciones, pero que no coinciden exactamente. Este hecho puede deberse a que a la hora de calcular los parámetros de corrección, el valor de ambos debía de variarse hasta que la potencia máxima de salida de las curvas utilizadas para estos cálculos estuviera dentro del 0,5% o mejor, y en algunos casos este hecho no era posible cumplirlo estrictamente. Una conclusión que se puede deducir, es que al aplicar este procedimiento no es determinante el material del que estén hechas las células ya que los resultados son muy similares para los cuatro módulos utilizados.

En el procedimiento 2 de corrección, se han obtenido unos resultados más exactos que en el Procedimiento 1, ya que según podemos observar en el capítulo 6, las curvas corregidas prácticamente coinciden con las curvas medidas en las mismas condiciones en los cuatro módulos utilizados, pero tampoco son exactamente iguales. Como en el procedimiento anterior, puede deberse a que a la hora de calcular los parámetros de corrección, el valor de ambos debía de variarse hasta que la potencia máxima de salida de las curvas utilizadas para estos cálculos estuviera dentro del 0,5% o mejor, y en algunos casos este hecho no era posible cumplirlo estrictamente. El hecho de que los resultados sean más exactos puede deberse a que en este procedimiento las ecuaciones de corrección eran más complejas. Este procedimiento es muy similar al Procedimiento 1, y como podemos comprobar en este caso, tampoco es determinante el material del que están hechas las células ya que los resultados son muy similares para los cuatro módulos utilizados.

En el Procedimiento 3, como podemos ver de los resultados mostrados en el capítulo 6, tanto para la corrección en irradiancia como para la corrección por temperatura, obtenemos unos resultados que prácticamente coinciden con las curvas medidas en condiciones similares en los cuatro módulos utilizados, aunque no exactamente. Esta diferencia puede deberse a que en este procedimiento, al corregir al valor deseado de irradiancia o temperatura, el otro parámetro venía determinado por la fórmula que vimos en el capítulo 5. Por lo tanto, a la hora de comparar la curva obtenida, ésta se comparaba con otra curva medida pero en condiciones similares y no iguales.

También cabe comentar que durante la realización del proyecto, al mismo tiempo que se hacían los cálculos de los distintos procedimientos para cada módulo se ha ido diseñando una plantilla en Excel para cada módulo fotovoltaico y para cada procedimiento, de forma que solamente introduciendo las curvas características en la plantilla, ésta haga la verificación de forma automática, es decir, que no sea necesario repetir todos los cálculos si se quiere comprobar que los resultados son los mismos para dos curvas características I-V cualesquiera. Por otro lado, en los dos primeros procedimientos de corrección había que calcular unos parámetros de corrección, por lo que también se podrán utilizar estas plantillas si se necesita calcular dichos parámetros en un futuro.

Por otra parte, con este proyecto he podido aprender cómo es un módulo fotovoltaico, y al tener la posibilidad de verlo instalado en la universidad he podido ver cómo está conectado, los sensores que utiliza, las estaciones meteorológicas que forman parte del equipo, etc. Así como el equipo que se encarga de recabar los datos y curvas características I-V de cada módulo, para después utilizar dichas curvas en la realización del proyecto.

# **CAPÍTULO 8**

## **REFERENCIAS**

## 8. REFERENCIAS

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

[1] Estudio técnico-económico de una instalación solar fotovoltaica conectada a red de 5kw. Esther Sanz López-Argumedo. 2009

[2] Manuales sobre energía renovable. Solar fotovoltaica. BUN-CA, Setiembre del 2002. San José, Costa Rica.

[3] Sistemas de energía solar fotovoltaica para equipos de telecomunicaciones. Alberto Escudero-Pascual. 2007.

[4] Estudio comparativo de un sistema fotovoltaico. 2010, Jorge Aguilera Tejero.

[5] Estimación de la energía generada por un sistema fotovoltaico. Miguel Alonso Abella y Faustino Chenlo.

[6] Caracterización de generadores fotovoltaicos. Alba Martín

[7] Máxima potencia de los inversores fotovoltaicos de conexión a red. Berta Gutiérrez Montes. 2009.

## ENLACES DE INTERNET:

- [8] [http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo\\_fotovoltaico](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_fotovoltaico) (Septiembre 2011)
- [9] <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2009/09/11/sistemas-fotovoltaicos/>  
(Septiembre 2011)
- [10] <http://saecsaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion/> (Septiembre 2011)
- [11] [http://www.solartronic.com/Energia\\_Solar/Sistemas\\_Fotovoltaicos/Curso\\_Breve/4\\_Curvas\\_Caracteristicas/](http://www.solartronic.com/Energia_Solar/Sistemas_Fotovoltaicos/Curso_Breve/4_Curvas_Caracteristicas/) (Septiembre 2011)
- [12] <http://www.sitiosolar.com/paneles%20fotovoltaicas.htm> (Septiembre 2011)

# **CAPÍTULO 9**

## **ANEXOS**

## 9. ANEXOS

### 9.1 ANEXO I: Normativa

Las actuales normas vigentes en cuanto a energía solar, energía fotovoltaica, módulos fotovoltaicos y células solares son las siguientes:

- UNE 20460-7-712:2006: Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 7-712: Reglas para las instalaciones y emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica (PV).
- UNE 206001:1997 EX: Módulos fotovoltaicos. Criterios ecológicos.
- UNE-EN 50380:2003: Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos.
- UNE-EN 50461:2007: Células solares. Información de la documentación técnica y datos del producto para células solares de silicio cristalino.
- UNE-EN 60891:1994: Procedimiento de corrección con la temperatura y la irradiancia de la característica I-V de dispositivos fotovoltaicos de silicio cristalino. (Versión oficial EN 60891:1994).

- UNE-EN 60904-10:1999: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 10: Métodos de medida de la linealidad.
- UNE-EN 60904-1:1994: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: medida de la característica intensidad-tensión de los módulos fotovoltaicos. (Versión oficial EN 60904-1:1993).
- UNE-EN 60904-1:2007: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos. (IEC 60904-1:2006).
- UNE-EN 60904-2/A1:1998: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos de células solares de referencia.
- UNE-EN 60904-2:1994: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: requisitos de células solares de referencia. (Versión oficial EN 60904-2:1993).
- UNE-EN 60904-2:2008: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos de dispositivos solares de referencia. (IEC 60904-2:2007).
- UNE-EN 60904-3:1994: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 3: fundamentos de medida de dispositivos solares fotovoltaicos (fv) de uso terrestre con datos de irradiancia espectral de referencia.
- UNE-EN 60904-5:1996: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 5: Determinación de la temperatura de la célula equivalente (TCE) de dispositivos fotovoltaicos (FV) por el método de la tensión de circuito abierto.



- UNE-EN 60904-6/A1:1998: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 6: Requisitos para los módulos solares de referencia.
- UNE-EN 60904-6:1997: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 6: Requisitos para los módulos solares de referencia.
- UNE-EN 60904-7:1999: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 7: Cálculo del error introducido por desacoplo espectral en las medidas de un dispositivo fotovoltaico.
- UNE-EN 60904-8:1999: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 8: Medida de la respuesta espectral de un dispositivo fotovoltaico (FV).
- UNE-EN 60904-9:2008: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 9: Requisitos de funcionamiento para simuladores solares.
- UNE-EN 61194:1997: Parámetros característicos de los sistemas fotovoltaicos (FV) autónomos.
- UNE-EN 61215:2006: Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación.
- UNE-EN 61345:1999: Ensayo ultravioleta para módulos fotovoltaicos (FV).
- UNE-EN 61646:1997: Módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para aplicación terrestres. Cualificación del diseño y aprobación de tipo.

- UNE-EN 61646:2009: Módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación.
- UNE-EN 61683:2001: Sistemas fotovoltaicos. Acondicionadores de potencia. Procedimiento para la medida del rendimiento.
- UNE-EN 61701:2000: Ensayo de corrosión por niebla salina de módulos fotovoltaicos (FV).
- UNE-EN 61702:2000: Evaluación de sistemas de bombeo fotovoltaico (FV) de acoplo directo.
- UNE-EN 61724:2000: Monitorización de sistemas fotovoltaicos. Guías para la medida, el intercambio de datos y el análisis.
- UNE-EN 61725:1998: Expresión analítica para los perfiles solares diarios.
- UNE-EN 61727:1996: Sistemas fotovoltaicos (FV). Características de la interfaz de conexión a la red eléctrica.
- UNE-EN 61730-1:2007: Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV).Parte 1: Requisitos de construcción. (IEC 61730-1:2004, modificada).

- UNE-EN 61730-2:2007: Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos para ensayos. (IEC 61730-2:2004, modificada).
- UNE-EN 61829:2000: Campos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino. Medida en el sitio de características I-V.
- UNE-EN 62093:2006: Componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Cualificación del diseño y ensayos ambientales (IEC62093:2005).
- UNE-EN 62124:2006: Equipos fotovoltaicos (FV) autónomos. Verificación de diseño. (IEC 62124:2004).
- CEI 60364-7-712:2002: Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 7-712: Reglas para las instalaciones y emplazamientos especiales. Sistemas de alimentación solar fotovoltaica (PV).
- CEI 60904-10:1998: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 10: Métodos de medida de la linealidad.
- CEI 60904-1:2006: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 1: Medida de la característica corriente-tensión de dispositivos fotovoltaicos.
- CEI 60904-2:1989: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos de células solares de referencia.

- CEI 60904-2:1989/A1:1998: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos de células solares de referencia.
- CEI 60904-2:2007: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos de dispositivos solares de referencia.
- CEI 60904-5:1993: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 5: Determinación de la temperatura de la célula equivalente (TCE) de dispositivos fotovoltaicos (FV) por el método de la tensión de circuito abierto.
- CEI 60904-8:1998: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 8: Medida de la respuesta espectral de un dispositivo fotovoltaico (FV).
- CEI 60904-9:2007: Dispositivos fotovoltaicos. Parte 9: Requisitos de funcionamiento para simuladores solares.
- CEI 61194:1992: Parámetros característicos de los sistemas fotovoltaicos (FV) autónomos.
- CEI 61215:1993: Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para aplicación terrestre. Cualificación del diseño y aprobación de tipo.
- CEI 61215:2005: Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación.
- CEI 61345:1998: Ensayo ultravioleta para módulos fotovoltaicos (FV).

- CEI 61646:2008: Módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para uso terrestre. Cualificación del diseño y homologación.
- CEI 61683:1999: Sistemas fotovoltaicos. Acondicionadores de potencia. Procedimiento para la medida del rendimiento.
- CEI 61701:1995: Ensayo de corrosión por niebla salina de módulos fotovoltaicos (FV).
- CEI 61702:1995: Evaluación de sistemas de bombeo fotovoltaico (FV) de acoplo directo.
- CEI 61725:1997: Expresión analítica para los perfiles solares diarios.
- CEI 61727:1995: Sistemas fotovoltaicos (FV). Características de la interfaz de conexión a la red eléctrica.
- CEI 61730-1:2004: Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 1: Requisitos de construcción.
- CEI 61730-2:2004: Cualificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos para ensayos.
- CEI 61829:1995: Campos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino - Medida en el sitio de características I-V.

- CEI 62093:2005: Componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Cualificación del diseño y ensayos ambientales.
- CEI 62124:2004: Equipos fotovoltaicos (FV) autónomos. Verificación de diseño.

## 9.2. ANEXO II: PROGRAMACIÓN DE LA HOJA EXCEL PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS EN EL PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN 3

Para la realización del procedimiento de corrección 3, ha sido necesario programar un Macro en una Hoja de cálculo de Excel para cada una de las correcciones.

### 9.2.1. Corrección para dos curvas.

```
Sub Procedimiento()
```

```
Dim i As Integer
```

```
Dim j As Integer
```

```
Dim flag As Boolean
```

```
Dim salida As Boolean
```

```
For i = 6 To 106
```

```
flag = False
```

```
salida = False
```

```
For j = 6 To 106
```

```
If salida = False Then 'cuando encuentra el valor más cercano calcula los datos y pasa a la siguiente vuelta del bucle
```

```
If Range("J" & i) >= Range("D2") Then 'Si I2 es menor que Isc2-Isc1 no se pueden hallar más puntos, el programa finaliza.
```

```
Range("L" & i) = Range("J" & i) 'Escribo I2
```

```
Range("M" & i) = Range("H" & j) 'Escribo I1
```

```
Range("N" & i) = (Range("J" & i) - Range("H" & j)) 'Escribo I2-I1
```

```
If Range("N" & i) = Range("D2") Then 'Si I2-I1=Isc2-Isc1 no hace falta interpolar
```

```
Range("O" & i) = Range("N" & i) 'escribo que coincide
```

```
Range("T" & i) = Range("G" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
```

```
Range("U" & i) = Range("H" & i)
```

```
Range("V" & i) = Range("I" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los originales
Range("W" & i) = Range("J" & i)
```

```
Range("X" & i) = (Range("T" & i) + Range("D1") * (Range("V" & i) - Range("T" & i))) 'Cálculo de V3
```

```
Range("Y" & i) = (Range("U" & i) + Range("D1") * (Range("W" & i) - Range("U" & i))) 'Cálculo de I3
```

```
flag = True
salida = True 'paso a la siguiente iteración
End If
```

```
If ((Range("N" & i) > Range("D2")) And (flag = False)) Then 'caso en el que hay que interpolar
```

```
Range("P" & i) = Range("N" & i) 'escribo que no coincide
```

```
Range("R" & i) = (Range("D2") + Range("M" & i)) 'Cálculo I2 interpolada
```

```
Range("S" & i) = (Range("R" & i) - Range("M" & i)) 'Compruebo que I2 interpolada-I1=Isc2-Isc1
```

```
'forma de interpolar para que no haya error de dividir entre cero
```

```
If Range("J" & (i + 1)) > 0 Then
  If (Range("J" & (i + 1)) - Range("J" & i)) = 0 Then
```

```
    Range("Q" & i) = (Range("I" & (i + 1)) + Range("I" & i)) / 2
```

```
  Else
    Range("Q" & i) = ((Range("R" & i) - Range("J" & i)) / (Range("J" & (i + 1)) - Range("J" & i))) * (Range("I" & (i + 1)) - Range("I" & i)) + Range("I" & i) 'Cálculo V2 interpolada
  End If
```

```
Else
  Range("Q" & i) = Range("I" & i)
End If
```

```
Range("T" & i) = Range("G" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
Range("U" & i) = Range("H" & i)
```

```
Range("V" & i) = Range("Q" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los interpolados
Range("W" & i) = Range("R" & i)
```

```
Range("X" & i) = (Range("T" & i) + Range("D1") * (Range("V" & i) - Range("T" & i))) 'Cálculo de V3
```

```
Range("Y" & i) = (Range("U" & i) + Range("D1") * (Range("W" & i) - Range("U" & i))) 'Cálculo de I3
```

```
flag = True
salida = True
```



```
End If  
  
End If  
  
End If  
  
Next 'salida del FOR  
  
Next  
  
End Sub 'fin del módulo
```

### 9.2.2. Corrección para tres curvas.

```
Sub Procedimiento()  
  
Dim i As Integer  
Dim j As Integer  
Dim flag As Boolean  
Dim salida As Boolean  
  
For i = 6 To 106  
  
    flag = False  
    salida = False  
  
    For j = 6 To 106  
  
        If salida = False Then 'cuando encuentra el valor más cercano calcula los datos y pasa a la  
            siguiente vuelta del bucle  
  
            If Range("J" & i) >= Range("D2") Then 'Si I2 es menor que Isc2-Isc1 no se pueden hallar más  
                puntos, el programa finaliza.  
  
                Range("L" & i) = Range("J" & i) 'Escribo I2  
                Range("M" & i) = Range("H" & j) 'Escribo I1  
  
                Range("N" & i) = (Range("J" & i) - Range("H" & j)) 'Escribo I2-I1  
  
                If Range("N" & i) = Range("D2") Then 'Si I2-I1=Isc2-Isc1 no hace falta interpolar
```

```
Range("O" & i) = Range("N" & i) 'escribo que coincide

Range("T" & i) = Range("G" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
Range("U" & i) = Range("H" & i)

Range("V" & i) = Range("I" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los originales
Range("W" & i) = Range("J" & i)

Range("X" & i) = (Range("T" & i) + Range("D1") * (Range("V" & i) - Range("T" & i))) 'Cálculo
de V3
Range("Y" & i) = (Range("U" & i) + Range("D1") * (Range("W" & i) - Range("U" & i)))
'Cálculo de I3

flag = True
salida = True 'paso a la siguiente iteración
End If

If ((Range("N" & i) > Range("D2")) And (flag = False)) Then 'caso en el que hay que interpolar

Range("P" & i) = Range("N" & i) 'escribo que no coincide

Range("R" & i) = (Range("D2") + Range("M" & i)) 'Cálculo I2 interpolada
Range("S" & i) = (Range("R" & i) - Range("M" & i)) 'Compruebo que I2 interpolada-I1=Isc2-
Isc1

'forma de interpolar para que no haya error de dividir entre cero

If Range("J" & (i + 1)) > 0 Then
    If (Range("J" & (i + 1)) - Range("J" & i)) = 0 Then

        Range("Q" & i) = (Range("I" & (i + 1)) + Range("I" & i)) / 2

    Else
        Range("Q" & i) = ((Range("R" & i) - Range("J" & i)) / (Range("J" & (i + 1)) - Range("J" &
i))) * (Range("I" & (i + 1)) - Range("I" & i)) + Range("I" & i) 'Cálculo V2 interpolada
    End If

Else
    Range("Q" & i) = Range("I" & i)
End If

Range("T" & i) = Range("G" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
Range("U" & i) = Range("H" & i)

Range("V" & i) = Range("Q" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los interpolados
Range("W" & i) = Range("R" & i)

Range("X" & i) = (Range("T" & i) + Range("D1") * (Range("V" & i) - Range("T" & i))) 'Cálculo
de V3
```

Range("Y" & i) = (Range("U" & i) + Range("D1") \* (Range("W" & i) - Range("U" & i))) 'Cálculo de I3

flag = True  
salida = True

End If

End If

End If

Next 'salida del FOR

Next

For i = 6 To 106

flag = False  
salida = False

For j = 6 To 106

If salida = False Then 'cuando encuentra el valor más cercano calcula los datos y pasa a la siguiente vuelta del bucle

If Range("AF" & i) >= Range("AF2") Then 'Si I2 es menor que Isc2-Isc1 no se pueden hallar más puntos, el programa finaliza.

Range("AO" & i) = Range("AM" & i) 'Escribo I2  
Range("AP" & i) = Range("AK" & j) 'Escribo I1

Range("AQ" & i) = (Range("AM" & i) - Range("AK" & j)) 'Escribo I2-I1

If Range("AQ" & i) = Range("AF2") Then 'Si I2-I1=Isc2-Isc1 no hace falta interpolar

Range("AR" & i) = Range("AQ" & i) 'escribo que coincide

Range("AW" & i) = Range("AJ" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales

Range("AX" & i) = Range("AK" & i)

Range("AY" & i) = Range("AL" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los originales

Range("AZ" & i) = Range("AM" & i)

Range("BA" & i) = (Range("AW" & i) + Range("AF1") \* (Range("AY" & i) - Range("AW" & i)))  
'Cálculo de V3

```
Range("BB" & i) = (Range("AX" & i) + Range("AF1") * (Range("AZ" & i) - Range("AX" & i)))
'Cálculo de I3

flag = True
salida = True 'paso a la siguiente iteración
End If

If ((Range("AQ" & i) > Range("AF2")) And (flag = False)) Then 'caso en el que hay que
interpoliar

Range("AS" & i) = Range("AQ" & i) 'escribo que no coincide

Range("AU" & i) = (Range("AF2") + Range("AP" & i)) 'Cálculo I2 interpolada
Range("AV" & i) = (Range("AU" & i) - Range("AP" & i)) 'Compruebo que I2 interpolada-
I1=Isc2-Isc1

'forma de interpolar para que no haya error de dividir entre cero

If Range("AM" & (i + 1)) > 0 Then
    If (Range("AM" & (i + 1)) - Range("AM" & i)) = 0 Then

        Range("AT" & i) = (Range("AL" & (i + 1)) + Range("AL" & i)) / 2

    Else
        Range("AT" & i) = ((Range("AU" & i) - Range("AM" & i)) / (Range("AM" & (i + 1)) -
Range("AM" & i))) * (Range("AL" & (i + 1)) - Range("AL" & i)) + Range("AL" & i) 'Cálculo V2
interpolada
    End If

Else
    Range("AT" & i) = Range("AL" & i)
End If

Range("AW" & i) = Range("AJ" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
Range("AX" & i) = Range("AK" & i)

Range("AY" & i) = Range("AT" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los
interpolados
Range("AZ" & i) = Range("AU" & i)

Range("BA" & i) = (Range("AW" & i) + Range("AF1") * (Range("AY" & i) - Range("AW" & i)))
'Cálculo de V3
Range("BB" & i) = (Range("AX" & i) + Range("AF1") * (Range("AZ" & i) - Range("AX" & i)))
'Cálculo de I3

flag = True
salida = True

End If
```

End If

End If

Next 'salida del FOR

Next

End Sub 'fin del módulo

### 9.2.3. Corrección para cuatro curvas.

Sub Procedimiento()

Dim i As Integer

Dim j As Integer

Dim flag As Boolean

Dim salida As Boolean

For i = 6 To 106

flag = False

salida = False

For j = 6 To 106

If salida = False Then 'cuando encuentra el valor más cercano calcula los datos y pasa a la siguiente vuelta del bucle

If Range("J" & i) >= Range("D2") Then 'Si I2 es menor que Isc2-Isc1 no se pueden hallar más puntos, el programa finaliza.

Range("L" & i) = Range("J" & i) 'Escribo I2

Range("M" & i) = Range("H" & j) 'Escribo I1

Range("N" & i) = (Range("J" & i) - Range("H" & j)) 'Escribo I2-I1

If Range("N" & i) = Range("D2") Then 'Si I2-I1=Isc2-Isc1 no hace falta interpolar

Range("O" & i) = Range("N" & i) 'escribo que coincide

Range("T" & i) = Range("G" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales

Range("U" & i) = Range("H" & i)

Range("V" & i) = Range("I" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los originales

```
Range("W" & i) = Range("J" & i)

Range("X" & i) = (Range("T" & i) + Range("D1") * (Range("V" & i) - Range("T" & i))) 'Cálculo
de V3
Range("Y" & i) = (Range("U" & i) + Range("D1") * (Range("W" & i) - Range("U" & i)))
'Cálculo de I3

flag = True
salida = True 'paso a la siguiente iteración
End If

If ((Range("N" & i) > Range("D2")) And (flag = False)) Then 'caso en el que hay que interpolar

Range("P" & i) = Range("N" & i) 'escribo que no coincide

Range("R" & i) = (Range("D2") + Range("M" & i)) 'Cálculo I2 interpolada
Range("S" & i) = (Range("R" & i) - Range("M" & i)) 'Compruebo que I2 interpolada-I1=Isc2-
Isc1

'forma de interpolar para que no haya error de dividir entre cero

If Range("J" & (i + 1)) > 0 Then
    If (Range("J" & (i + 1)) - Range("J" & i)) = 0 Then

        Range("Q" & i) = (Range("I" & (i + 1)) + Range("I" & i)) / 2

    Else
        Range("Q" & i) = ((Range("R" & i) - Range("J" & i)) / (Range("J" & (i + 1)) - Range("J" &
i))) * (Range("I" & (i + 1)) - Range("I" & i)) + Range("I" & i) 'Cálculo V2 interpolada
    End If

Else
    Range("Q" & i) = Range("I" & i)
End If

Range("T" & i) = Range("G" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
Range("U" & i) = Range("H" & i)

Range("V" & i) = Range("Q" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los interpolados
Range("W" & i) = Range("R" & i)

Range("X" & i) = (Range("T" & i) + Range("D1") * (Range("V" & i) - Range("T" & i))) 'Cálculo
de V3
Range("Y" & i) = (Range("U" & i) + Range("D1") * (Range("W" & i) - Range("U" & i))) 'Cálculo
de I3

flag = True
salida = True

End If
```

End If

End If

Next 'salida del FOR

Next

For i = 6 To 106

flag = False

salida = False

For j = 6 To 106

If salida = False Then 'cuando encuentra el valor más cercano calcula los datos y pasa a la siguiente vuelta del bucle

If Range("AF" & i) >= Range("AF2") Then 'Si I2 es menor que Isc2-Isc1 no se pueden hallar más puntos, el programa finaliza.

Range("AO" & i) = Range("AM" & i) 'Escribo I2

Range("AP" & i) = Range("AK" & j) 'Escribo I1

Range("AQ" & i) = (Range("AM" & i) - Range("AK" & j)) 'Escribo I2-I1

If Range("AQ" & i) = Range("AF2") Then 'Si I2-I1=Isc2-Isc1 no hace falta interpolar

Range("AR" & i) = Range("AQ" & i) 'escribo que coincide

Range("AW" & i) = Range("AJ" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales

Range("AX" & i) = Range("AK" & i)

Range("AY" & i) = Range("AL" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los originales

Range("AZ" & i) = Range("AM" & i)

Range("BA" & i) = (Range("AW" & i) + Range("AF1") \* (Range("AY" & i) - Range("AW" & i)))

'Cálculo de V3

Range("BB" & i) = (Range("AX" & i) + Range("AF1") \* (Range("AZ" & i) - Range("AX" & i)))

'Cálculo de I3

flag = True

salida = True 'paso a la siguiente iteración

End If

```
If ((Range("AQ" & i) > Range("AF2")) And (flag = False)) Then 'caso en el que hay que
interpolar

Range("AS" & i) = Range("AQ" & i) 'escribo que no coincide

Range("AU" & i) = (Range("AF2") + Range("AP" & i)) 'Cálculo I2 interpolada
Range("AV" & i) = (Range("AU" & i) - Range("AP" & i)) 'Compruebo que I2 interpolada-
I1=Isc2-Isc1

'forma de interpolar para que no haya error de dividir entre cero

If Range("AM" & (i + 1)) > 0 Then
    If (Range("AM" & (i + 1)) - Range("AM" & i)) = 0 Then

        Range("AT" & i) = (Range("AL" & (i + 1)) + Range("AL" & i)) / 2

    Else
        Range("AT" & i) = ((Range("AU" & i) - Range("AM" & i)) / (Range("AM" & (i + 1)) -
Range("AM" & i))) * (Range("AL" & (i + 1)) - Range("AL" & i)) + Range("AL" & i) 'Cálculo V2
interpolada
    End If

Else
    Range("AT" & i) = Range("AL" & i)
End If

Range("AW" & i) = Range("AJ" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales
Range("AX" & i) = Range("AK" & i)

Range("AY" & i) = Range("AT" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los
interpolados
Range("AZ" & i) = Range("AU" & i)

Range("BA" & i) = (Range("AW" & i) + Range("AF1") * (Range("AY" & i) - Range("AW" & i)))
'Cálculo de V3
Range("BB" & i) = (Range("AX" & i) + Range("AF1") * (Range("AZ" & i) - Range("AX" & i)))
'Cálculo de I3

flag = True
salida = True

End If

End If

End If

Next 'salida del FOR

Next
```



For i = 6 To 106

flag = False  
salida = False

For j = 6 To 106

If salida = False Then 'cuando encuentra el valor más cercano calcula los datos y pasa a la siguiente vuelta del bucle

If Range("BI" & i) >= Range("BI2") Then 'Si I2 es menor que Isc2-Isc1 no se pueden hallar más puntos, el programa finaliza.

Range("BR" & i) = Range("BP" & i) 'Escribo I2  
Range("BS" & i) = Range("BN" & j) 'Escribo I1

Range("BT" & i) = (Range("BP" & i) - Range("BN" & j)) 'Escribo I2-I1

If Range("BT" & i) = Range("BI2") Then 'Si I2-I1=Isc2-Isc1 no hace falta interpolar

Range("BU" & i) = Range("BT" & i) 'escribo que coincide

Range("BZ" & i) = Range("BM" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales

Range("CA" & i) = Range("BN" & i)

Range("CB" & i) = Range("BO" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los originales

Range("CC" & i) = Range("BP" & i)

Range("CD" & i) = (Range("BZ" & i) + Range("BI1") \* (Range("CB" & i) - Range("BZ" & i)))  
'Cálculo de V3

Range("CE" & i) = (Range("CA" & i) + Range("BI1") \* (Range("CC" & i) - Range("CA" & i)))  
'Cálculo de I3

flag = True  
salida = True 'paso a la siguiente iteración  
End If

If ((Range("BT" & i) > Range("BI2")) And (flag = False)) Then 'caso en el que hay que interpolar

Range("BV" & i) = Range("BT" & i) 'escribo que no coincide

Range("BX" & i) = (Range("BI2") + Range("BS" & i)) 'Cálculo I2 interpolada

Range("BY" & i) = (Range("BX" & i) - Range("BS" & i)) 'Compruebo que I2 interpolada-I1=Isc2-Isc1

'forma de interpolar para que no haya error de dividir entre cero

If Range("BP" & (i + 1)) > 0 Then

If (Range("BP" & (i + 1)) - Range("BP" & i)) = 0 Then

Range("BW" & i) = (Range("BO" & (i + 1)) + Range("BO" & i)) / 2

Else

Range("BW" & i) = ((Range("BX" & i) - Range("BP" & i)) / (Range("BP" & (i + 1)) - Range("BP" & i))) \* (Range("BO" & (i + 1)) - Range("BO" & i)) + Range("BO" & i) 'Cálculo V2 interpolada

End If

Else

Range("BW" & i) = Range("BO" & i)

End If

Range("BZ" & i) = Range("BM" & i) 'V1 e I1 para calcular la curva corregida son los originales

Range("CA" & i) = Range("BN" & i)

Range("CB" & i) = Range("BW" & i) 'V2 e I2 para calcular la curva corregida son los interpolados

Range("CC" & i) = Range("BX" & i)

Range("CD" & i) = (Range("BZ" & i) + Range("BI1") \* (Range("CB" & i) - Range("BZ" & i)))

'Cálculo de V3

Range("CE" & i) = (Range("CA" & i) + Range("BI1") \* (Range("CC" & i) - Range("CA" & i)))

'Cálculo de I3

flag = True

salida = True

End If

End If

End If

Next 'salida del FOR

Next

End Sub 'fin del módulo